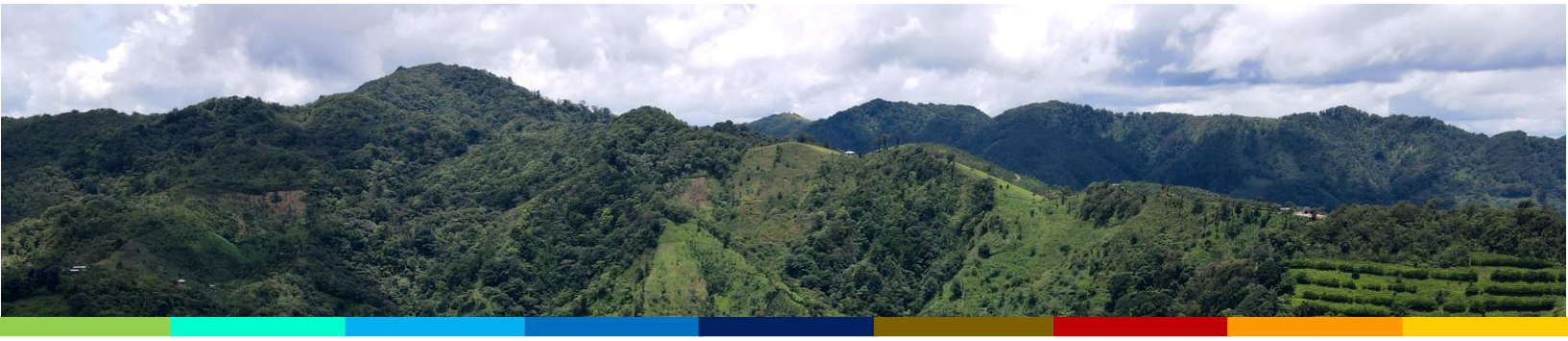


INFORME SOBRE LA ESTIMACIÓN HIDROLÓGICA DE LOS APORTES FLUVIALES DE LA QUEBRADA, TRIBUTARIO DE RÍO NAMALE, SOBRE LA COTA 936 M S.N.M., CON PROPÓSITOS DE APROVECHAMIENTO DEL RECURSO HÍDRICO

Ciudad de El Paraíso, Departamento de El Paraíso.

BORRADOR

Responsable:
M. Sc. Carlos Ábrego Suárez / CICH 6614

Carlos Abrego Suárez

CONTENIDO

GLOSARIO 8
ACRÓNIMOS 10
1. INTRODUCCIÓN 15
2. GENERALIDADES 16
2.1 Ubicación del proyecto 16
2.2 Realidad problemática 17
3. OBJETIVOS 17
3.1 Objetivo general 17
3.2 Objetivos específicos 17
4. METODOLOGÍA 18
4.1 Análisis hidrológico 18
4.2 Análisis hidráulico-fluvial 23
4.3 Criterios para la selección del período de retorno 24
4.4 Criterios para la definición de la amenaza por inundación fluvial 26
4.4.1 Categorización de la amenaza por inundación según la UMGIR 26
4.4.2 Categorización de la amenaza por inundación según el ARR 28
5. INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA 30
5.1 Información climatológica 30
5.1.1 Fenómenos climáticos regionales 30
5.1.2 Registros pluviales locales 36
5.1.3 Análisis estadístico de los percentiles de lluvia diaria 42
5.1.4 Registros de temperatura media mensual 44
5.2 Registros hidrométricos 47
6. ANÁLISIS HIDROLÓGICO 50
6.1 Modelos digitales de elevación 50
6.2 Delimitación de la superficie de aportación 53
6.3 Características morfométricas de la superficie de aportación 53
6.4 Series de suelos 55
6.4.1 Suelos Chinampa (Chn) 56
6.5 Clasificación hidrológica de los suelos 57
6.6 Usos y cobertura forestal de los suelos 58
6.6.1 Bosque 59

BORRADOR

6.6.2 Agroforestal 60
6.6.3 Agropecuario 60
6.6.4 Cuerpos de agua 60
6.6.5 Otros usos 60
6.7 Estimación del número de curva 61
6.8 Estimación del tiempo de concentración 63
6.9 Estimación de aportes fluviales mediante el SMA 64
6.9.1 Conceptualización teórica 64
6.9.2 Parámetros adoptados 67
6.9.3 Distribuidor temporal de las lluvias diarias 69
6.9.4 Estimación de la evapotranspiración 69
6.9.5 Resumen de los caudales medios diarios sintéticos 72
6.9.6 Análisis estadístico del escurrimiento sintético anual 73
6.9.7 La Curva de Duración característica 73
6.10 Determinación de caudales de diseño 75
6.10.1 Simulación hidrológica de eventos en HEC-HMS 75
6.10.2 Registros pluviales de corta duración 76
6.10.3 La tormenta de diseño 76
6.10.4 Resumen de los caudales de avenida para diversos períodos de retorno 77
7. EL RESERVORIO 79
7.1 Características del reservorio 79
7.2 Operación del reservorio 81
7.3 Estimación de la población objetivo 83
8. ANÁLISIS HIDRÁULICO 87
9. CONCLUSIONES 88
10. RECOMENDACIONES 89
11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 90

BORRADOR

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas del control para el análisis hidrológico en UTM WGS84 16N 16
Tabla 2. Determinación de los coeficientes de rugosidad mediante el Método de Cowan. 23
Tabla 3. Valores típicos de la recurrencia de diseño para obras de distinto. 24

Tabla 4. Criterios para la selección del período de retorno según el objetivo del diseño. 25
Tabla 5. Clasificación de represas según Snyder, 1964. 26
Tabla 6. Determinación de la intensidad de la inundación fluvial. 27
Tabla 7. Determinación del nivel de frecuencia según el período de retorno. 27
Tabla 8. Determinación del nivel de amenaza según la frecuencia y su intensidad. 28
Tabla 9. Clasificaciones climáticas de Köppen-Geiger para el Departamento de El Paraíso. 31
Tabla 10. Registros pluviométricos medios mensuales de las principales estaciones de interés. 38
Tabla 11. Registros de temperatura media mensual de las principales estaciones de interés. 45
Tabla 12. Factores de forma del tributario principal en la zona de interés. 54
Tabla 13. Resumen de los usos y coberturas forestales de los suelos en la superficie de drenaje de interés. 61
Tabla 14. Resumen del número de curva en la subcuenca de interés. 62
Tabla 15. Resumen de los tiempos de concentración de las principales unidades de respuesta hidrológica. 63
Tabla 16. Parámetros adoptados para la implementación del SMA en la microcuenca de La Quebrada.. 67
Tabla 17. Valores de la curva de duración característica para el período 1987-2025. 74
Tabla 18. Resumen de los caudales de avenida en la Subcuenca de La Quebrada. 78
Tabla 19. Hidrograma de los caudales de avenida para los períodos de retorno de 50, 100, 200, 500 y 1000 años 78
Tabla 20. Coordenadas de eje de presa en UTM WGS84 16P. 80
Tabla 21. Población por municipio en el Departamento de El Paraíso. 83
Tabla 22. Estimación de la población en la Ciudad de El Paraíso y su proyección a 2050. 85
Tabla 23. Dinámica de operación del reservorio para diversas dotaciones considerando el reservorio lleno. 86

BORRADOR

LISTADO DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Hidrograma Unitario Adimensional del SCS, desarrollado por Víctor Mockus. 21
Gráfico 2. Solución gráfica de la escorrentía directa según el Número de Curva, para una precipitación acumulada. 22
Gráfico 3. Representación gráfica de la intensidad de la inundación fluvial. 27
Gráfico 4. Representación gráfica de la amenaza de la inundación fluvial. 28
Gráfico 5. Representación gráfica de la amenaza de la inundación fluvial. 29
Gráfico 6.Variación de la anomalía de temperaturas en el Océano Pacífico a lo largo del último siglo..... 35
Gráfico 7. Variación de la anomalía de temperaturas en el Océano Pacífico a lo largo del último siglo.... 36
Gráfico 8. Precipitación diaria en las estaciones con registros de lluvia utilizados. 37
Gráfico 9. Precipitación media mensual en la Estación Pluviométrica de Jacaleapa. 38
Gráfico 10. Análisis de doble masa entre los registros diarios de lluvia en Jacaleapa y La Escuela (izq); análisis de doble masa de los registros diarios satelitales y la observación en Jacaleapa (der). 38
Gráfico 11. Precipitación media mensual en la Estación Pluviométrica de Jacaleapa. 39

Gráfico 12. Precipitación anual por año hidrológico ajustado a la Estación Hidrometeorológica La Escuela. 41
Gráfico 13. Percentiles de la precipitación acumulada para un año hidrológico promedio. 42
Gráfico 14. Comparación de la evolución de diferentes ciclos hidrológicos en referencia al ciclo hidrológico característico ajustados a la Estación Hidrometeorológica La Escuela. Ciclo hidrológico 1988-89 y 1998-99. 43
Gráfico 15. Comparación de la evolución de diferentes ciclos hidrológicos en referencia al ciclo hidrológico característico ajustados a la Estación Hidrometeorológica La Escuela. Ciclo hidrológico 2004-05 y 2008-09. 44
Gráfico 16. Comparación de la evolución de diferentes ciclos hidrológicos en referencia al ciclo hidrológico característico ajustados a la Estación Hidrometeorológica La Escuela. Ciclo hidrológico 2011-12 y 2020-21. 44
Gráfico 17. Distribución media mensual de los registros de temperatura en la superficie de interés..... 45
Gráfico 18. Variación local de la temperatura trasladando las temperaturas de las estaciones hasta el nivel medio del mar (izquierda) y variación de la temperatura media anual con respecto a la elevación (derecha). 46
Gráfico 19. Registros limnimétricos en la AHS-001 del tributario de Río Namale, con sus respectivos observadores. Serie histórica 10.2023-08.2025. 49
Gráfico 20. Caudales medios diarios en la AHS-001 del tributario de Río Namale. Serie histórica 10.2023-08.2025. 49
Gráfico 21. Caudales medios diarios en la AHS-001 del tributario de Río Namale. Serie histórica 10.2023-04.2024. 49
Gráfico 22. Perfil longitudinal (izq.) y curva hipsométrica relativa (der.) de La Quebrada. 55
Gráfico 23. Simulación en condición bidimensional de un escenario de tormenta para conocer la respuesta de La Quebrada, mediante simulación hidráulica de la precipitación en HEC-RAS. 64
Gráfico 24. Curva de recesión de La Quebrada para el ciclo hidrológico 2023-24. 68
Gráfico 25. Tormenta de diseño para un período de retorno de 2 años. 69
Gráfico 26. Percentiles diarios de la ETP mediante el método de García B. – López D. para un año hidrológico característico en la Estación Hidrometeorológica La Escuela. 71
Gráfico 27. Caudales medios diarios sintéticos a lo largo de un año hidrológico característico. 73
Gráfico 28. Disponibilidad del recurso hídrico según la oferta simulada de La Quebrada. 74
Gráfico 29. Curva de duración para el período de simulación hidrológica 1987-2025. 75
Gráfico 30. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia de la Estación Climatológica de Villa Ahumada. . 76
Gráfico 31. Tormenta de Diseño para el área de drenaje de La Quebrada, sobre la cota 925 m s.n.m. 77
Gráfico 32. Tormenta de Diseño para el área de drenaje de La Quebrada, sobre la cota 925 m s.n.m. 77
Gráfico 33. Curvas de elevación-área-capacidad del potencial embalse en La Quebrada. 80
Gráfico 34. Perfil longitudinal del eje de presa con su correspondiente espejo de agua para una cota de 932.5 m s.n.m. 81
Gráfico 35. Curva de duración característica 82
Gráfico 36. Simulación del comportamiento del embalse en La Quebrada, sobre la cota 925 msnm, con una dotación estimada en $\mathbf{55}\ \boldsymbol{l/s}$, equivalente a una extracción sostenida de 15.8 MMC anuales. 82

BORRADOR

Gráfico 37. Tasa de crecimiento poblacional en el Municipio de El Paraíso en los últimos 12 años. 85
Gráfico 38. Distribución poblacional en la Ciudad de El Paraíso. Fuente: INE, 2025. 86

LISTADO DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Obra de toma, con vista hacia el ingreso de los aportes sobre la cota 932 msnm. 15
Ilustración 2. Ubicación del sitio en análisis, con las corrientes fluviales de interés. 16
Ilustración 3. Clasificación Climática de Köppen-Geiger a escala mundial y nacional. 31
Ilustración 4. Clasificación Climática de Köppen-Geiger para el área de interés. 32
Ilustración 5. Esquema de las celdas atmosféricas en los hemisferios terrestres. 33
Ilustración 6. Zona de Convergencia Intertropical y sus diferentes manifestaciones. 33
Ilustración 7. Patrón de variación de las temperaturas en el Océano Pacífico que sirven de umbral para categorizar el Fenómeno de El Niño Oscilación Sur (ENOS). 35
Ilustración 8. Localización de las estaciones pluviométricas más relevantes en las inmediaciones del área de drenaje. 36
Ilustración 9. Condiciones de humedad de los vientos bajo ciertas condiciones orográficas. 39
Ilustración 10. Dirección del viento en la zona oriental del país. Nótese la ubicación del proyecto en sotavento. 40
Ilustración 11. Distribución espacial de la precipitación media anual sobre la zona oriental del país. 41
Ilustración 12. Distribución espacial de la temperatura en la zona. Fuente: Elaboración propia. 46
Ilustración 13. Proceso de restauración del sitio de presa. De izquierda a derecha: condición previa, restauración y estado de la obra de toma en la actualidad. 47
Ilustración 14. Ubicación de las escalas limnimétricas (izq) y diferentes representaciones de estas (der). 48
Ilustración 15. Data Loggers instalados para el monitoreo de variables hidrometeorológicas y escalas limnimétricas. 48
Ilustración 16. Comparación entre dos modelos digitales de elevación: SRTM GDEM (izquierda) y el FABDEM (derecha). Nótese la mejor representación de los cauces en el modelo FABDEM. 51
Ilustración 17. Actividad de campo correspondiente al levantamiento topográfico. 52
Ilustración 18. Modelo digital de elevaciones mediante LiDAR en el sitio potencial del reservorio (izq.) con su respectiva ortofoto (der.) 52
Ilustración 19. Superficie de aportación de La Quebrada, tributario de Río Namale. 53
Ilustración 20. Series de suelos en la superficie de aportación de La Quebrada, tributario de Río Namale. 56
Ilustración 21. Series de suelos en la superficie de aportación de La Quebrada, tributario de Río Namale. 58
Ilustración 22. Uso y cobertura forestal de los suelos en la superficie de aportación de La Quebrada. 59
Ilustración 23. Uso y cobertura forestal de los suelos en la superficie de aportación de La Quebrada. 62
Ilustración 24. Captura de pantalla del modelo hidrológico conceptual SMA en HEC-HMS. 72

BORRADOR

Ilustración 25. Simulación de la precipitación horaria en la subcuenca y su respuesta en forma de escurrimiento. 72
Ilustración 26. Ubicación del eje de presa propuesto para La Quebrada. 79
Ilustración 27. Distribución de la población 84

BORRADOR

GLOSARIO

A_____

ALUVIAL – *proceso donde el material se transporta principalmente por agua. Material granular transportado por el agua, depositado posteriormente en zonas donde la energía de la corriente es incapaz de desplazarle.*

AÑO HIDROLÓGICO – *Período de doce meses que comprende un ciclo hidrológico completo, partiendo del mes en que se observa el inicio de la temporada lluviosa. En Honduras el año hidrológico comprende de mayo a abril.*

ÁREA INUNDABLE – *una llanura relativamente plana que bordea una corriente y está cubierta por sus aguas en la fase de la inundación de dos veces la profundidad máxima de Bankfull.*

AVENIDA – *incremento de los niveles de la corriente de forma significativamente mayor a los caudales medios que por ella transitan.*

B_____

BANKFULL – *etapa delineada por el punto de elevación de la inundación incipiente, indicada por los depósitos de arena o limo en la marca de fregado activo, la rotura en la pendiente de la Ribera de la Ribera, el límite de vegetación perenne, la decoloración de la roca y la exposición al pelo de raíz.*

C_____

CAUCE – *también conocido como lecho, representa la depresión natural del terreno, en forma de valle, por donde se concentra y discurre la escorrentía superficial.*

CAUCE MAYOR – *está representado por las vegas y bancos de desbordamiento. Corresponde a la llanura a la que recurren los volúmenes de la crecida cuando es superada la capacidad hidráulica del cauce menor o preferencial.*

CAUCE MENOR – *está representado por sección hidráulica por la que discurren los flujos de forma recurrente. Comúnmente se encuentra libre de vegetación y presenta coluviones como respuesta del flujo confinado.*

CAUDAL – *volumen de agua que pasa por una sección en particular durante un período de tiempo definido.*

CAUDAL UNITARIO – *representa el rendimiento o caudal por unidad de área de una superficie de aportación.*

CONFLUENCIA – *lugar donde se unen los flujos de dos o más corrientes.*

CORRIENTE – *un cuerpo de agua encontrado en la superficie de la Tierra y confinado a una estrecha depresión topográfica, por la que fluye y transporta partículas de roca, sedimentos y partículas disueltas. Esta definición contiene los ríos, arroyos y tributarios.*

CUENCA – *área que comprende la totalidad de la superficie de drenaje hasta un punto de interés conocido como control.*

CUMULONIMBUS – *nube amazacotada y densa, con un desarrollo vertical considerable en forma de montaña o una enorme torre, con la cima normalmente aplastada.*

D_____

DATUM – *se construye sobre un elipsoide de referencia, y puede incorporar variaciones locales de elevación.*

DEGRADACIÓN – *proceso por el cual el gradiente de un arroyo se hace menos empinado, debido a la erosión del sedimento del lecho del arroyo. Tal erosión generalmente sigue a una fuerte reducción en la cantidad de sedimento que entra en la corriente.*

DEPOSICIÓN – *en términos de erosión, es el asentamiento de partículas.*

DOTACIÓN – *monto o cantidad necesaria de agua para satisfacer las necesidades de los habitantes como un promedio diario.*

E_____

ELEVACIÓN – *medida de longitud vertical relativa a un Datum.*

ELIPSOIDE – *forma tridimensional generada a partir de una elipse bidimensional.*

EMBALSE – *presa, represa, reservorio.*

EROSIÓN – *el proceso por el cual las partículas de la roca y el suelo se aflojan, como por la intemperie, y después se transportan en otra parte, como por el viento, el agua, el hielo, o la gravedad.*

ESCORRENTÍA – *volumen de agua que pasa por una sección en particular durante un período de tiempo. Volumen de agua como fracción de la lámina de lluvia que no se infiltra.*

ESTACIÓN HIDROMÉTRICA – *estructura de observación y registro de los niveles de la corriente constituida primordialmente por escalas limnimétricas, y en algunos casos, sensores digitales de nivel de la corriente.*

ESTACIÓN PLUVIOGRÁFICA – *facilidad construida con el propósito de realizar observaciones de la precipitación de forma continua. Convencionalmente, los registros pluviográficos son registrados mediante papel destinado para tal fin, de forma que se obtiene la evolución de la lluvia sin necesidad de recurrir a intervalos de tiempo para su representación, permitiendo realizar análisis de la lluvia de corta duración con fines de diseño. En la actualidad, es frecuente el uso de sensores digitales para la captura de esta información por la facilidad en el manejo de los datos.*

ESTACIÓN PLUVIOMÉTRICA – *facilidad construida con el propósito de realizar observaciones de la precipitación de forma discreta. Convencionalmente, los registros pluviométricos son anotados por un observador en una libreta, de forma que se obtienen acumulados diarios de lluvia.*

F_____

FLUJO BASE – *Etapa en el flujo alimentado con agua subterránea.*

H_____

HEC-HMS – *software de libre distribución para la modelización hidrológica de caudales desarrollado por el U.S. Army Corp of Engineers.*

HEC-RAS – *software de libre distribución para el análisis hidráulico de caudales sobre corrientes naturales.*

HIDROGRAMA – *respuesta de una cuenca en particular en forma de volúmenes por unidad de tiempo, producto de un evento pluvial con capacidad de generar escurrimiento, hasta un punto conocido como control. Gráfica que muestra la variación del caudal de una corriente a través del tiempo, para un punto en particular.*

HIDROGRAMA UNITARIO – *respuesta unitaria de la cuenca ante un evento pluvial de 1 milímetro de precipitación efectiva, hasta un punto en particular conocido como control.*

HIETOGRAMA – *histograma de precipitación a paso de tiempo definido. Representación de la tormenta de diseño en forma discreta.*

I_____

INUNDACIÓN – *ocupación temporal de las aguas de una corriente a consecuencia del incremento de los volúmenes que esta transporta.*

ICF – *Instituto de Conservación Forestal.*

L_____

LLANURA INUNDABLE – *tierra que está activamente (inundada más allá de Bankfull una vez cada 1-2 años), generalmente amplia, suavemente inclinada del suelo del Valle, a menudo limitada por una terraza (llanura de inundación abandonada temporalmente) o ladera lateral que invade.*

LLUVIA EFECTIVA – *componente de la precipitación que es considerada como la lámina de lluvia con potencial de convertirse en escorrentía directa.*

N_____

NRCS – *National Resources Conservation Service.*

BORRADOR

O_____

OMM – *Organización Meteorológica Mundial.*

P_____

PENDIENTE DE CANAL – *cambio de elevación dividido por la longitud del canal a lo largo de una distancia de canal de 20-30 secuencias de rápidos / remansos o 2 longitudes de meandros. Pendiente del valle / sinuosidad.*

R_____

RÁSTER – *formato de presentación de información espacial representada por pixeles.*

REPRESA – *toda barrera artificial, incluidas las obras accesorias, construida para represar o desviar agua, aguas residuales, materiales líquidos transportados o sólidos que puedan fluir si están saturados. Todas las estructuras necesarias para mantener el nivel de agua en un embalse o para desviar un cauce de su curso se considerarán como una sola presa.*

RESERVORIO – *represa.*

RUGOSIDAD – *en términos hidráulicos, es la característica propia de la superficie que ocasiona la resistencia al flujo de una corriente. Ésta es variable, depende de diversos factores dependientes entre sí.*

S_____

SINUOSIDAD – *relación entre la longitud del canal y la longitud del valle. Relación entre la pendiente del valle y la pendiente del canal.*

SEDIMENTO – *material fragmentado que es transportado por el agua desde el lugar de origen hasta su zona de deposición.*

SIG – *Sistemas de Información Geográfica.*

SMN – *Servicio Meteorológico Nacional.*

T_____

TERRAZA FLUVIAL – *una llanura de inundación abandonada temporalmente, debido a la incisión o descenso del río, etc.*

THALWEG – *esquema longitudinal / traza / prospección de una parte más profunda del lecho del río de la fuente a la boca (aguas arriba / aguas abajo). Línea de pendiente más empinada a lo largo del arroyo. (Vaguada).*

TIEMPO DE CONCENTRACIÓN – *estimación del periodo de tiempo en el que la totalidad de la unidad hidrológica de interés concentra la escorrentía desde su punto más remoto, hidrológicamente hablando.*

TRAMO – *unidad de longitud de tipo de canal con el mismo tipo de canal existente para una longitud superior a veinte anchos de canal Bankfull (Rosgen). La longitud del canal es uniforme con respecto a la descarga, profundidad, área y pendiente. La longitud de un canal para el cual una sola galga proporciona una medida satisfactoria de la etapa y descarga. La longitud de un río entre dos estaciones de medición. Más generalmente, cualquier longitud de un río.*

TRIBUTARIO – *corriente que vierte sus flujos a otro considerado principal o de primer orden.*

U_____

UNIDAD HIDROLÓGICA – *idealización de las superficies de aportación que conforman la cuenca de interés, atendiendo criterios de morfología, pendiente de la corriente principal, tipo de suelo, cobertura forestal, por mencionar algunas.*

V_____

VAGUADA – *depresión en un valle que normalmente constituye el recorrido de las corrientes. (Thalweg).*

VALLE – *depresión en la superficie terrestre drenada por, y cuya forma es cambiada por, el agua bajo la fuerza atractiva de la gravedad, entre dos tierras altas adyacentes.*

BORRADOR

ACRÓNIMOS

ADH	Agua de Honduras
AMC	Antecedent Moisture Condition
AMDC	Alcaldía Municipal del Distrito Central
ARC	Antecedent Runoff Condition
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
BL	Breaklines
BM	Banco Mundial
CENAOS	Centro de Estudios Atmosféricos, Oceanográficos y Sísmicos
CEDVS	Centro de Estudios y Desarrollo del Valle de Sula
CEVS	Comisión Ejecutiva del Valle de Sula
CCIVS	Comisión para el Control de Inundaciones del Valle de Sula
CICH	Colegio de Ingenieros Civiles de Honduras
CHICO	Cámara Hondureña de Industria de la Construcción
COPECO	Secretaría de Estado en los Despachos de Gestión del Riesgo y Contingencias Nacionales
COSUDE	Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación
CODEL	Comité de Emergencia Local
CODEM	Comité de Emergencia Municipal
CODER	Comité de Emergencia Regional
DAI	Development Alternatives, Inc.
DEHC	Departamento de Estudios Hidrológicos y Climatológicos
DGRH	Dirección General de recursos Hídricos
DSBC	Downstream Boundary Condition / Condición de frontera aguas abajo
EDF	Electricité de France
EHS	Institute for Environment and Human Security
ENEE	Empresa Nacional de Energía Eléctrica
ENOS	El Niño Oscilación Sur
ENP	Empresa Nacional Portuaria
FABDEM	Forest and Buildings removed Copernicus Digital Elevation Model
FACES	Facultad de Ciencias Espaciales
FEMA	Federal Emergency and Management Agency
FHIS	Fondo Hondureño de Inversión Social
FHWA	Federal Highway Administration
GIR	Gestión Integral del Riesgo
GIS	Geographical Information System
GOAL	Cooperación Irlandesa Internacional
GOH	Gobierno de Honduras
HEC	Hydrologic Engineering Center
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center - River Analysis System
ICF	Instituto de Conservación Forestal
IGN	Instituto Geográfico Nacional
IHCIT	Instituto Hondureño de Ciencias de La Tierra
IPCC	Panel Intergubernamental de Cambio Climático
MITIGAR	Primer Proyecto de Prevención y Mitigación del Riesgo de Desastres Naturales
MRH	Manual de Referencias Hidrológicas
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NRCS	National Resources Conservation Services
OMM	Organización Meteorológica Mundial
Pe	Probabilidad de excedencia
PGRD	Proyecto Gestión de Riesgos de Desastres
PMDN	Proyecto de Mitigación de Desastres Naturales
PNUD	Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo

BORRADOR

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

RR	Refined Regions
SANAA	Servicio Autónoma Nacional de Acueductos y Alcantarillados
SAT	Sistema de Alerta Temprana
SCS	Soil Conservation Service
SECOPT	Secretaría de Obras Públicas y Transporte
SERNA	Secretaría de Estado en los Despachos de Recursos Naturales y Ambiente
sFD	Steady Flow Data
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SINAGERH	Sistema Nacional de Gestión de Riesgos de Honduras
SINIT	Sistema Nacional de Información Territorial
SIT	Secretaría de Infraestructura y Transporte
SMN	Servicio Meteorológico Nacional
SOPTRAVI	Secretaría de Obras Públicas, Transporte y Vivienda
SPS	San Pedro Sula
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TR	Período de retorno, también asociado al inverso de la probabilidad de excedencia.
uFD	Unsteady Flow Data
UGR	Unidad de Gestión de Riesgos
UMA	Unidad Municipal Ambiental
UMGIR	Unidad Municipal de Gestión Integral de Riesgos
UNAH	Universidad Nacional Autónoma de Honduras
UNU	Universidad de Naciones Unidas
USA	United States of America / Estados Unidos de América
USAID	United States Agency for International Development
USACE	United States Army Corp of Engineers
USBC	Upstream Boundary Condition / Condición de frontera aguas arriba
USDA	United States Department of Agriculture
USGS	United Stated Geological Survey
WGS	World Geographic System
WMO	World Meteorological Organization
WRC	Water Resources Council
XS	Cross Section / Sección Transversal
ZCIT	Zona de Convergencia Intertropical
ZMVS	Zona Metropolitana del Valle de Sula

BORRADOR

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

AGRADECIMIENTO

Este consultor desea expresar su más sincero agradecimiento a la Municipalidad de El Paraíso que, a través de su equipo técnico, la Unidad de SERMUPAS, el cuerpo de Regidores y la guía de la Sra. Alcaldesa, la Lic. Ligia Isabel Laínez Bermúdez, han tenido la visión de realizar un estudio técnico-científico, orientado a la valoración del recurso hídrico de una actual obra de aprovechamiento, con la intención de explorar la oferta de la modesta corriente fluvial.

Esta investigación ha sido llevada a cabo por un período cercano a los dos años y medio, tiempo en el que el acompañamiento institucional, así como la paciencia y la confianza depositada en el trabajo técnico, han sido fundamentales para la consecución de los objetivos propuestos.

ACKNOWLEDGEMENT

The author wishes to express his most sincere gratitude to the Municipality of El Paraíso which, through its technical team, SERMUPAS Unit, the council members, and under the guidance of the Mayor, Lic. Ligia Isabel Laínez Bermúdez, had the vision to undertake a technical–scientific study aimed at assessing the water resources of an existing water use project, with the purpose of exploring the potential of the modest fluvial stream.

This research has been carried out over a period of nearly two years, during which institutional support, patience and the trust placed in technical work have been fundamental to the achievement of the proposed objectives.

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

BORRADOR

VERSIÓN DIGITAL

Todos los ríos van a dar al mar, pero el mar nunca se llena. A su origen vuelven los ríos, para de allí volver a fluir...
- Eclesiastés 1:7

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

Obra de toma sobre el tributario de Río Namale, en las inmediaciones de la Comunidad Río Arriba.
- Carlos Ábrego 17.05.2024

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la natural expansión de los centros urbanos ha obligado a los planificadores urbanos a explorar opciones cada satisfacer la creciente demanda por acceso al agua potable. La Ciudad de El Paraíso no es una excepción, con una población estimada en 26 500 habitantes[1], aproximadamente, y en su búsqueda por dar una respuesta a la demanda por agua potable ha iniciado exploraciones sobre uno de sus principales sitios de abastecimiento.

La fuente de principal interés para la autoridad municipal corresponde a la de un tributario del Río Namale, sobre la cota 925 m s.n.m., que posee una modesta área de drenaje de 3 kilómetros cuadrados, brindando sus aportes de forma regular para su aprovechamiento, al menos durante la mayor parte del ciclo hidrológico.

Conocer la regularidad con la que esta corriente brinda sus aportes fluviales, así como las características que controlan su agotamiento, forma parte de los objetivos de esta investigación, para poder establecer la oferta hídrica de la corriente fluvial. Esta actividad ha sido desarrollada a través del software de modelización hidrológica HEC-HMS en su versión más reciente, procurando realizar un balance hídrico a través del módulo conocido como *Soil Moisture Accounting*.

Adicional a ello, se realizó un levantamiento topográfico del sitio de potencial aprovechamiento para determinar las *curvas de elevación-área-almacenamiento*, indispensables para poder establecer las condiciones de la operación de un reservorio construido para regular los aportes en su etapa más crítica, el estiaje.

Este documento, pretende resumir las actividades desarrolladas, así como los hallazgos, de la investigación a lo largo de estos últimos dos años y medio, definiendo valores de aprovechamiento, dimensiones sugeridas del reservorio, y una propuesta de aprovechamiento para diferentes referencias de los aportes fluviales, conociendo la curva de agotamiento del área de drenaje.

ORRADOR

Ilustración 1. Obra de toma, con vista hacia el ingreso de los aportes sobre la cota 932 msnm.

[1] *Según datos brindados por el INE, en su reporte Proyecciones El Paraíso, 2013-2030: Proyecciones de población total por sexo y edad de 2013 a 2030 (valores absolutos y relativos, con estimaciones derivadas).*

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

2. GENERALIDADES

2.1 Ubicación del proyecto

Ubicado en oriente de Honduras, el Departamento de El Paraíso es uno de los departamentos del país que es un emblema nacional por su producción de tabaco. A nivel municipal, el Municipio de El Paraíso es reconocido por el cultivo del café que, por la altitud y condición climática de sus montañas, brinda características deseadas para algunas de las variedades más apreciadas a nivel mundial.

El sitio de interés se localiza al sur del casco urbano de la Ciudad de El Paraíso, Departamento de El Paraíso, con coordenadas UTM WGS84 549680 m E y 1529420 m N, a una elevación aproximada de 925 m s.n.m. La siguiente ilustración detalla la localización de la zona del proyecto, desde un contexto continental al local.

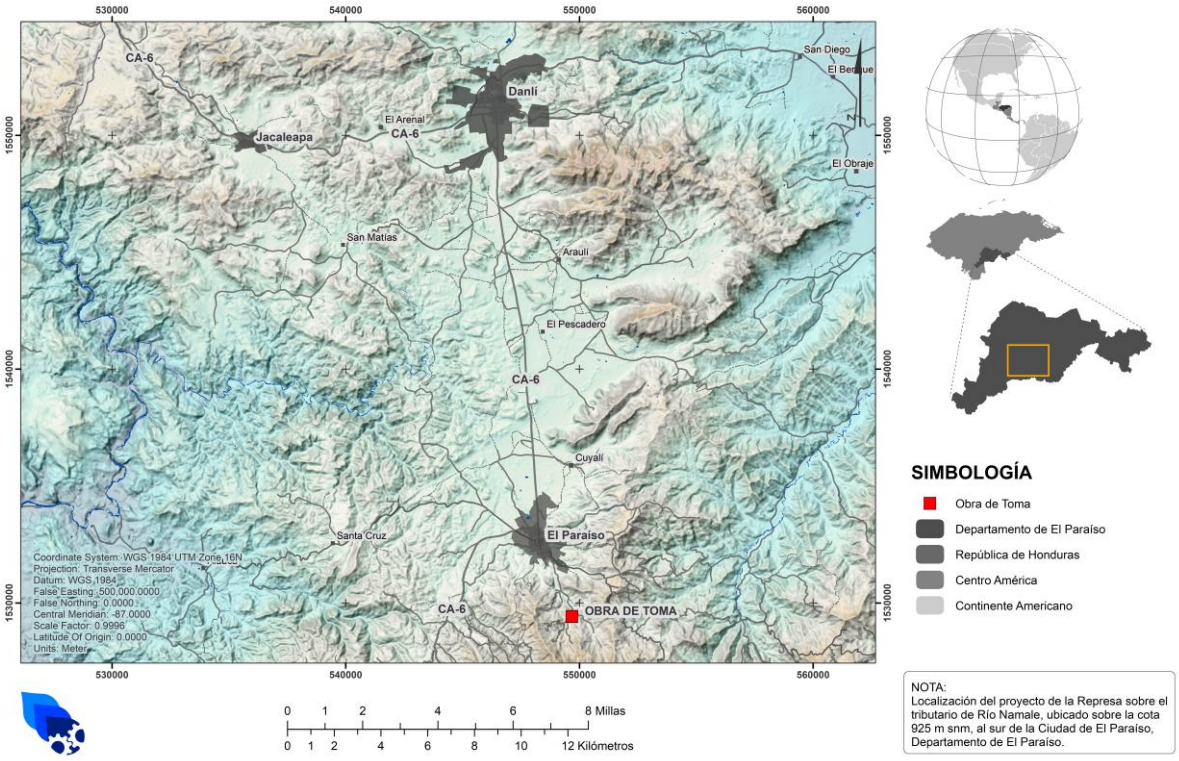


Ilustración 2. Ubicación del sitio en análisis, con las corrientes fluviales de interés.

A continuación, se detallan las coordenadas del control para el análisis hidrológico de los aportes fluviales mediante un balance hídrico:

Tabla 1. Coordenadas del control para el análisis hidrológico en UTM WGS84 16N

Sitio	**Este**, m	**Norte**, m	**Elevación**, m s.n.m.
Control en la quebrada para análisis hidrológico	549680	1529420	925
Obra de toma 932 para observación de caudales	549688	1529462	932

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

2.2 Realidad problemática

En principio, la natural expansión de las zonas en desarrollo, como la Ciudad de El Paraíso, enfrentan la compleja tarea de identificar zonas con potencial para el abastecimiento de agua para consumo humano. Esta labor requiere de la estimación de fuentes que permitan suplir la demanda proyectada al menos a 20 años a futuro.

La administración municipal, en pleno conocimiento de esta necesidad, ha emprendido acciones para garantizar la disponibilidad de diversas opciones de aprovechamiento, identificando uno de los dos tributario que conforman el Río Namale como la corriente fluvial objeto de mayor interés para conocer los valores de aprovechamiento y represamiento.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

- Realizar una valoración de los aportes fluviales, susceptibles de aprovechamiento, de uno de los principales tributarios de Río Namale, sobre la cota 925 m s.n.m. con el fin de determinar la capacidad de un reservorio que permita regular la oferta hídrica para el consumo humano.

3.2 Objetivos específicos

- Instalación de una estación hidrométrica para poder determinar los caudales medios diarios de la superficie de aportación.
- Instalación de una estación hidrometeorológica para obtener variables atmosféricas relevantes que faciliten la reconstrucción de una serie sintética de registros hidrometeorológicos.
- Obtención de registros pluviométricos de las estaciones pluviométricas relevantes más cercanas.
- Calibración de un modelo hidrológico orientado a la conceptualización de un balance hídrico de la superficie de aportación.
- Determinar la curva de agotamiento de la superficie de aportación.
- Realizar un levantamiento topográfico de alta precisión mediante LiDAR para conocer la geometría del reservorio.
- Identificar un potencial eje de presa y determinar las curvas de elevación-área-capacidad del embalse.
- Estimar los caudales de crecida de la quebrada, sobre la cota 925 m s.n.m., para los períodos de retorno de 50, 100, 200, 500 y 1000 años.
- Establecer una simulación de la operación del embalse que permita determinar la dotación de aprovechamiento para diversos escenarios de cota de la superficie del embalse en relación a los aportes de la quebrada.

BORRADOR

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

4. METODOLOGÍA

El desarrollo de las actividades desarrolladas puede enmarcarse en dos procesos bien diferenciados: la estimación hidrológica del régimen de los aportes fluviales de la quebrada; y la evaluación de la operación del embalse para estimar la dotación óptima.

Esta dotación será definida con la proyección de la población a futuro, considerando el crecimiento poblacional de tipo geométrico, con información disponible a través del Instituto Nacional de Estadística (INE) y realizando algunos ajustes con los datasets de World Population[2].

$$P_f = P_0 \cdot (1 + i)^N$$

, donde

P_f	Población final, hab
P_0	Población inicial, hab
i	Tasa anual de crecimiento poblacional
N	Período de análisis, años

A continuación, de forma resumida detallaremos la metodología empleada para realizar las estimaciones de los aportes fluviales y el comportamiento de la operación del embalse.

4.1 Análisis hidrológico

Para el desarrollo de este tipo de estudios, la información hidrométrica, en conjunto con los registros pluviométricos, representan la base del análisis del balance de humedad en la cuenca. El software de modelización hidrológica **HEC-HMS v4.13** ha sido escogido para esta labor de establecer el comportamiento del escurrimiento a través de la separación de la fracción de la lluvia que se convierte en flujo base, este último, el sustento del caudal durante el período de estiaje.

Frente a ello, se ha considerado el realizar una estimación mediante modelización hidrológica de los escurrimientos en el sitio de presa, acudiendo a los registros pluviales de la Estación Climatológica de Jacaleapa[3], ajustados con la data observada en la Estación Hidrometeorológica La Escuela[4].

La derivación de los aportes fluviales de una corriente, apoyándose en las observaciones de precipitación a nivel diario, ha sido llevada a cabo mediante la implementación del procedimiento del *Soil Moisture Accounting*[5] (SMA) contenido en el *Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System*[6] (HEC-HMS).

BORRADOR

[2] www.worldpop.org
[3] *Si bien, existen otras estaciones más próximas a la subcuenca, ninguna de ellas logra la longitud y consistencia de los registros diarios observados en la Estación Climatológica de Jacaleapa, con coordenadas UTM WGS84 16P 535994 m E, 1549595 m N y una elevación de 820 m s.n.m.*
[4] *La Estación Hidrometeorológica La Escuela se encuentra en las coordenadas UTM WGS84 16P 549558 m E, 1529058 m N y una elevación de 990 m s.n.m.*
[5] *El Soil Moisture Accounting es un procedimiento de modelización hidrológica continua de lluvia-escorrentía, simulando el comportamiento del subsuelo bajo condiciones húmedas y secas.*
[6] *Software especializado para la modelización hidrológica de eventos.*

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

El *SMA*, es un modelo hidrológico continuo, que simula las condiciones climáticas húmedas y secas. Esta metodología pretende transformar los espesores de lluvia en escorrentía, a partir de las características propias de la cuenca bajo análisis, como ser: área, tiempo de concentración, tipo de suelos y cobertura vegetal (HEC, 2011, pág. 43).

Otras variables tipificadas que se destacan en este procedimiento son: las abstracciones iniciales, tanto por follaje o intercepción, así como por empozamiento del suelo; la evapotranspiración; la conductividad hidráulica, de acuerdo a valores típicos de la literatura atendiendo las texturas del suelo; la capacidad de almacenamiento del suelo, que es función de la porosidad del mismo; la tasa de infiltración típica, según la capacidad hidrológica y, finalmente, la tasa de percolación en el subsuelo (Hydrologic Engineer Center, 2011, pág. 139).

De esta forma, podemos concluir que el SMA es un balance hídrico, donde el escurrimiento superficial está directamente relacionado a la precipitación, las condiciones de humedad de la cuenca y la evapotranspiración, derivado de la ecuación de balance de agua en el suelo según la FAO:

$$ES = P - ET - D \pm \Delta FS$$

, donde

ES	Escurrimiento superficial, mm
P	Precipitación, mm
ET	Evapotranspiración, mm
D	Percolación profunda, mm
ΔFS	Cambio en el flujo superficial, mm

En lo concerniente a la evapotranspiración, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO[7]) ha propuesto la ecuación de *Penman-Monteith* como la sugerida para la estimación de la Evapotranspiración de Referencia (ET_o), tal como se detalla en el documento (FAO, 1990, pág. 28), definida por la siguiente expresión:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

, donde

ET_0	Evapotranspiración de referencia, $mm\ day^{-1}$
R_n	Radiación neta en la superficie del cultivo, $MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$
G	Densidad de flujo de calor en el suelo, $MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$
T	Temperatura media diaria del aire a 2 m de altura, $Celsius$
u_2	Velocidad del viento a 2 m de altura, $m\ s^{-1}$
e_s	Presión de vapor de saturación, kPa
e_a	Presión de vapor actual, kPa
$e_s - e_a$	Déficit de presión de vapor, kPa
Δ	Pendiente de la curva de vapor de presión, $kPa\ °C^{-1}$
γ	Constante psicométrica, $kPa\ °C^{-1}$

[7] *FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations.*

BORRADOR

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

También, se ha revisado la propuesta desarrollada por Javier García Benavides y Javier López Díaz, presentada en la VII Reunión Latinoamericana adaptada al trópico (15°N – 15°S), en 1970, detallada a través de la siguiente expresión:

$$ETP = 1.21x10^{7.45T/(234.7+T)}(1 - 0.01HR) + 0.21T - 2.30$$

, donde ETP Evapotranspiración potencial, $mm\ day^{-1}$
T Temperatura media diaria del aire a 2 m de altura, $Celsius$
HR Humedad relativa del aire a 2 m de altura, %

Adicional a ello, se ha realizado una simulación básica del comportamiento del potencial embalse, definiendo las variables de entrada y salida del sistema del reservorio; los aportes fluviales de la quebrada representan la variable de entrada al sistema, mientras que las salidas de este están definidas por la evaporación y la dotación.

Por su parte, para la estimación de los caudales de avenida se contempló el atender los procedimientos establecidos por el *Natural Resources Conservation Service* (NRCS), recurriendo a una simulación hidrológica de un evento hidrometeorológico en el software HEC-HMS[8], en vista que todas las unidades hidrológicas analizadas poseen áreas mayores a las 150 hectáreas; subcuencas menores, como en el caso del drenaje urbano, suelen ser atendidas a través del Método Racional Modificado.

El otrora Servicio de Conservación de Suelos (SCS), para el proceso de transformación de escorrentía superficial en respuesta de pulso unitario, propuso un modelo de Hidrograma Unitario (H.U.) paramétrico. En el corazón del modelo SCS se encuentra un H.U. adimensional de un solo pico. Este H.U. adimensional, expresa la descarga unitaria, U_t, como una relación con la descarga pico, U_p, para cualquier tiempo t, una fracción del tiempo hasta el pico, T_p. La investigación realizada por SCS sugiere que el pico del H.U., U_p, y el tiempo del pico, T_p, están relacionados por:

$$U_p = C\frac{A}{T_p}$$

, donde A es el área de la cuenca, C la constante de conversión (2.08 para el Sistema Internacional); el tiempo al pico T_p, también conocido como tiempo de ascenso está relacionado con la duración de la unidad de exceso de precipitación, tal como se detalla a continuación:

$$T_p = \frac{\Delta t}{2} + t_{lag}$$

, en la que Δt es la duración del exceso de precipitación y t_{lag} es el tiempo de retardo, definido como la diferencia de tiempo entre el centro de masa del exceso de lluvia y la máxima ordenada del Hidrograma Unitario.

[8] *Hydrologic Modeling System del Hydrologic Engineering Center. Software desarrollado por el United State Army Corp of Engineers (USACE) para la modelización hidrológica de eventos hidrometeorológicos sobre áreas de aportación con características morfométricas definidas.*

BORRADOR

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

La relación del Hidrograma Unitario adimensional, desarrollada por Víctor Mockus[9], en función de la duración del exceso de lluvia Δt y el tiempo de retardo t_{lag} se detalla a través del siguiente gráfico:

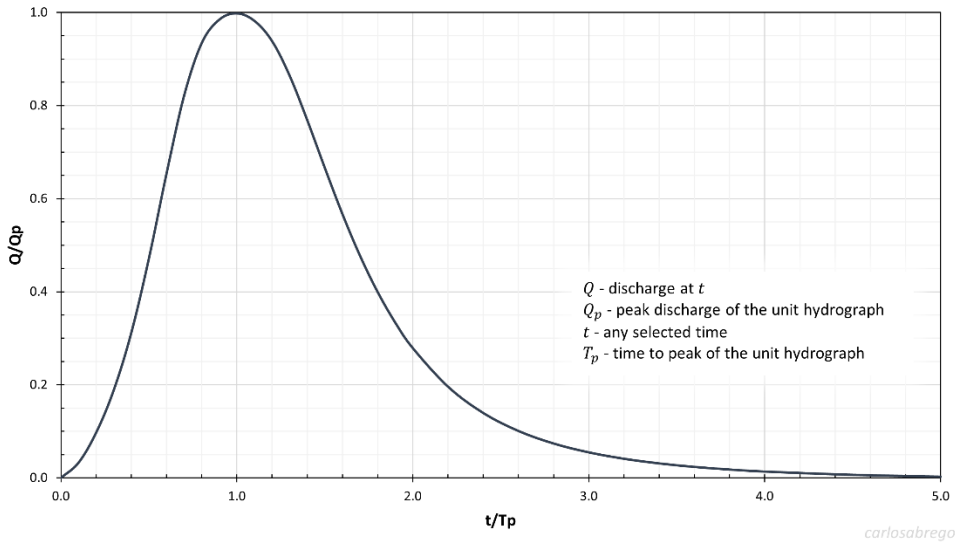


Gráfico 1. Hidrograma Unitario Adimensional del SCS, desarrollado por Víctor Mockus.

Definida las relaciones que determinan el comportamiento de los excesos de lluvia, a través de la respuesta unitaria, es necesaria la determinación de los excesos de lluvia en función de la precipitación acumulada; para ello, se requiere la estimación del Número de Curva (CN, por sus siglas en inglés), donde variables como la cobertura del suelo, el uso de la tierra y la humedad antecedente, son necesarias para su cálculo. Las siguientes expresiones detallan la relación existente entre estos parámetros:

$$P_e = \frac{(P - 0.2 \cdot S)^2}{(P + 0.8 \cdot S)}$$

$$S = \frac{25400 - 254CN}{CN}$$

, donde

P_e	Exceso de lluvia acumulado a un tiempo t, mm
S	Retención máxima potencial, mm
CN	Número de curva, $adim$

La solución gráfica a estas relaciones se detalla a continuación:

[9] *Victor Mockus fue el desarrollador de la teoría del hidrograma unitario sintético propuesta por el Soil Conservation Service en 1969.*

BORRADOR

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

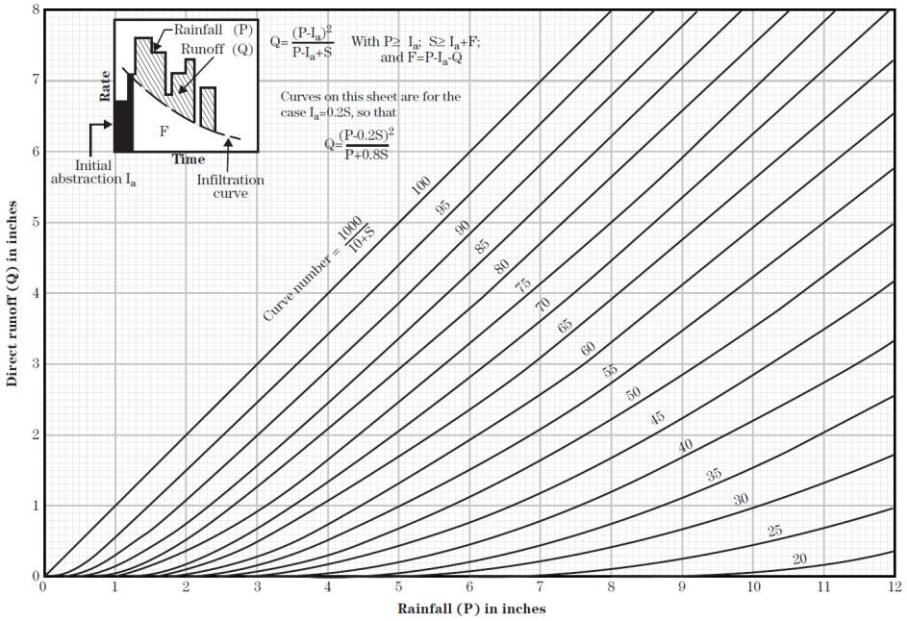


Gráfico 2. Solución gráfica de la escorrentía directa según el Número de Curva, para una precipitación acumulada.

Por su parte, el Método Racional Modificado, permite asociar mediante una relación directa la magnitud de los caudales de diseño en proporción con la intensidad de los registros pluviales de corta duración para los períodos de retorno de interés. Esta expresión, requiere de la estimación de un coeficiente de escorrentía C, una intensidad de lluvia I para determinado período de retorno y el área de cuenca A, todas en unidades apropiadas con el propósito que el caudal Q, normalmente expresado en m^3/s, para determinado período de retorno sea coherente:

$$Q_{TR} = 0.278 \cdot C \cdot I_{TR} \cdot A$$

, donde

Q_{TR}	Caudal de diseño, $m^3\ s^{-1}$
C	Coeficiente de escorrentía, $adim$
I_{TR}	Intensidad de la tormenta para determinada frecuencia, mm/h
A	Área de drenaje, Km^2

La principal limitación del Método Racional Modificado, al aplicarse a superficies de aportación mayores a las 150 hectáreas, es la inadecuada representación de los flujos durante una tormenta con una duración prolongada, en especial, los sitios que poseen obras de drenaje con limitada capacidad de evacuación, donde al menos un hidrograma con un desarrollo triangular es requerido.

BORRADOR

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

4.2 Análisis hidráulico-fluvial

El análisis del comportamiento hidráulico de la crecida sobre el reservorio se ha recurrido al software de modelización hidráulica HEC-RAS[10], definiendo la geometría del embalse y la cortina tipo para hacer la simulación de las crecidas de diseño, definidas para los escenarios de 50, 100, 200, 500 y 1000 años de período de retorno.

La conceptualización del modelo hidráulico necesitó de la estimación de los coeficientes de rugosidad de Manning, mismos que fueron atendidos mediante inspección local, evidencias fotográficas y la formulación empírica de Cowan (Chow, Open Channel Hydraulics, 1994, pág. 106).

$$n = m_5(n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)$$

La siguiente tabla permite realizar esta estimación de forma conveniente:

Tabla 2. Determinación de los coeficientes de rugosidad mediante el Método de Cowan.

ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE MANNING - [NOMBRE DE LA CORRIENTE]

n_i	*Concepto*	*Condición del cauce*	n	*Estimación*	*Observaciones*
n_0	Material del cauce	Tierra	0.020		
		Roca	0.025		
		Gravas finas	0.024		
		Gravas gruesas	0.028		
n_1	Grado de irregularidad	Suave	0.000		
		Menor	0.005		
		Moderada	0.010		
		Severa	0.020		
n_2	Variación de las secciones transversales	Gradual	0.000		
		Alternadas ocasionalmente	0.005		
		Alternadas frecuentemente	0.010-0.015		
n_3	Efecto relativo de las obstrucciones	Despreciable	0.000		
		Menor	0.010-0.015		
		Significativo	0.020-0.030		
		Severo	0.040-0.050		
n_4	Vegetación	Baja	0.005-0.010		
		Media	0.010-0.025		
		Alta	0.025-0.050		
		Muy alta	0.050-0.100		
m	Grado de meandricidad	Menor	1.000		
		Apreciable	1.150		
		Severo	1.300		
n	**COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE MANNING**			---	

BORRADOR

Asimismo, de forma complementaria, la literatura ya ofrece suficiente material para poder evaluar un coeficiente de rugosidad según las características encontradas en campo (United States Geological Survey, 1989), aunque su final adopción sea aún un tema de mucha discusión entre los especialistas.

La descripción del movimiento del agua, así como el desarrollo de perfiles de la superficie de esta (WSE[11]) se apoyará en las soluciones planteadas por Manning y la ecuación de continuidad de masa, bajo el entendido que las obras de drenaje estarían trabajando en condición de lámina libre para la simplificación de los cálculos hidráulicos.

[10] River Analysis System del Hydrologic Engineering Center. Software desarrollado por el United State Army Corp of Engineers (USACE) para la modelización hidráulica de corrientes fluviales y obras de drenaje.
[11] WSE: Water surface elevation.

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

$Q = v \cdot A_h$ / Ecuación de continuidad de masa.

$Q = \frac{1}{n} \cdot A_h \cdot {R_h}^{2/3} \cdot S^{1/2}$ / Ecuación de Manning para estimar el caudal sobre un canal

$Q = C_d \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H}$ / Ecuación de flujo a través de un orificio

$Q = \frac{4}{15} \cdot C_d \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot \Delta H^{5/2}$ / Ecuación del flujo sobre un vertedor triangular ($\theta = 45°$)

$Q = \frac{2}{3} \cdot C_d \cdot B \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot \Delta H^{3/2}$ / Ecuación del flujo sobre un vertedor rectangular ($B = 4.5m$)

, donde Q representa el caudal en m^3/s, v representa la velocidad de flujo en una sección transversal de interés en m/s, A_h es el área hidráulica de la sección de flujo en m^2, R_h el radio hidráulico en m, S es la pendiente promedio[12] del canal, C_d es el coeficiente de contracción de la sección de flujo, D es el diámetro del orificio en m, g es la gravedad terrestre en m/s^2, ΔH es la diferencia entre el nivel de la superficie del agua y la cota de rebose en m.

4.3 Criterios para la selección del período de retorno

Muchos son los criterios que se han utilizado para la determinación del período de retorno en los diseños de obras civiles, donde los costos asociados a la pérdida o deterioro de la obra, así como la cantidad de afectados por la misma, son algunas de las consideraciones para la elección de este. A continuación, se brindan algunos de los lineamientos de referencia en nuestros país que sirven de referencia al momento de seleccionar el período de retorno para el diseño de obras civiles.

La otrora Secretaría de Obras Públicas, Transporte y Vivienda (SOPTRAVI), a través de la Dirección de Carreteras, elaboró el Manual de Carreteras de Honduras en 1996, reservando un apartado específicamente para el tema de drenaje, en su Tomo VI. En este, se detallan los valores típicos de la recurrencia de un evento, asociado a obras de distinto tipo (SOPTRAVI, 1996, pág. 25), detallado a través de la siguiente tabla:

Tabla 3. Valores típicos de la recurrencia de diseño para obras de distinto.

Tipo de estructura	T_R, años
Puentes en caminos principales donde el remanso puede ocasionar daños a la propiedad privada o resultar en la pérdida del puente	50 – 100
Puentes en caminos secundarios o alcantarillas en caminos principales	25
Alcantarillas en caminos secundarios, colectores pluviales o cunetas laterales	5 – 10
Tragantes, bordillos, conductos[13]	1 – 2

Fuente: Manual de Carreteras de Honduras, SOPTRAVI 1996.

Sin embargo, los criterios del Manual de Carreteras fueron considerados para obras de drenaje, por lo que, en una adaptación de las **Recomendaciones técnicas para la elaboración de mapas de**

[12] Este consultor se permite suponer como adimensional la pendiente, bajo el entendido que representa una razón de cambio que viene expresada en las mismas unidades, por lo que se omite su incorporación.
[13] Se considera tolerable la anegación durante períodos cortos.

BORRADOR

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

amenaza por inundación fluvial (INETER & COSUDE, 2005), como resultado del Proyecto **MET-ALARN**, una colaboración entre el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER) y la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE), logró definir criterios para la selección del período de retorno que, posteriormente, fueron adoptados por la Comisión Permanente de Contingencias (COPECO), entidad estatal que se encarga de brindar instrumentos y estrategias orientadas a salvaguardar la vida e integridad de los hondureños.

Estas dos referencias técnicas han sido consideradas dentro de los requerimientos de los estudios orientados a la estimación de la amenaza por inundación, detallando que los períodos de retorno a utilizar serán según el objetivo del análisis, tal como se detalla a través de la siguiente tabla:

Tabla 4. Criterios para la selección del período de retorno según el objetivo del diseño.

Objetivo del diseño	Norma	T_R, años
Obras que involucren análisis de desastres	Reglamento de Reducción de Riesgos de Desastres AMDC	25 y 50
Obras de drenaje menor	Manual de Carreteras de Honduras	10, 25 y 50

Fuente: Monitoreo y seguimiento de KfW, AMDC 2021.

En el caso de obras hidráulicas de gran envergadura, Honduras no posee lineamientos específicos, por lo que se ha recurrido a seguir las sugerencias de la *Federal Emergency Management Agency* (FEMA), de *United States of America* (USA), ente gubernamental encargado de la gestión del riesgo en Estados Unidos de Norte América.

La FEMA, en un documento titulado "**Summary of Existing Guidelines for Hydrologic Safety of Dams**", se detalla que, ya en 1973, seguido de 4 años de investigación, un comité de la *American Society of Civil Engineers* (ASCE), encargado de la reevaluación de la adecuación de los desagües de las presas existentes, publicó un reporte en *Journal of Hydraulics Division* donde se defendió la idea de *asumir un riesgo* al momento de definir el diseño de la capacidad de los vertederos, recomendando para represas nuevas un análisis económico exhaustivo del costo social de los riesgos y el costo de la modificación. El nivel de riesgo sugerido debe ser tal que la suma de todos los costos sociales resulte mínima (FEMA, 2018, pág. 50).

Adicional a ello, el reporte establece que 10 000 años de período de retorno puede ser considerado como un escenario con una frecuencia conservativamente baja, sin embargo, lo suficientemente alta para los análisis de eventos extremos asociados a una Crecida Máxima Probable. No obstante, este escenario puede aceptarse cuando los niveles asociados a una rotura o falla de la represa afecten significativamente aguas abajo, tal como se detalló en el párrafo anterior.

Debido a este arbitrario escenario, aplicable a proyectos de gran envergadura, se recurrió a la clasificación de represas propuesta por Snyder (Snyder, 1964), detallada a través de la siguiente tabla:

BORRADOR

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

Tabla 5. Clasificación de represas según Snyder, 1964.

Categoría de la falla	**Potencial de peligro**		**Potencial de daño**		**Crecida de diseño**, TR
	Almacenamiento, $x10^6$ m^3	Altura, m	Pérdidas de vida, -	Daño, -	
Menor	< 1.2	15.2	Ninguno	Costo de la represa	50 – 100
Intermedia	1.2 – 61.7	12.2 – 30.5	Posible/menor	Dentro de la capacidad del propietario	SPF*
Intolerable	> 61.7	> 18.3	Considerable	Excesivo	PMF**

** SPF: Standar Project Flood o Crecida de Proyecto Estándar.*
*** PMF: Probable Maximum Flood o Crecida Máxima Probable.*

La Crecida de Proyecto Estándar es una crecida en la cuenca como respuesta a una tormenta de proyecto que representa condiciones hidrometeorológicas severas pero plausibles en la región, sin llegar a ser la Precipitación Máxima Probable (PMP).

Frente a todo lo anterior, atendiendo la realidad particular de este proyecto, los períodos de retorno considerados por este consultor corresponden a 50, 100, 200, 500 y 1 000 años para el diseño de la obra asociada a las crecidas fluviales, considerando que el reservorio sugerido prevé un almacenamiento de unos 5000 m^3, tal como se detallará en posteriores apartados.

4.4 Criterios para la definición de la amenaza por inundación fluvial

Los criterios para el análisis de amenaza por inundación fueron atendidos a través de dos metodologías bien definidas: la herramienta de categorización de amenazas por inundación de la ***Unidad Municipal de Gestión Integral de Riesgo*** *(UMGIR)* de la *Alcaldía Municipal del Distrito Central (AMDC)* y la herramienta de categorización de amenaza por inundación del ***Australian Rainfall & Runoff*** *(ARR)* de Australia.

En los próximos apartados se detallarán ambas metodologías.

4.4.1 Categorización de la amenaza por inundación según la UMGIR

La categorización de la amenaza por inundación, propuesta[14] por la UMGIR, en un principio fue desarrollada según los criterios brindados en el documento *Recomendaciones técnicas para la elaboración de Mapas de Amenazas por Inundaciones* (PNUD & Cooperación Suiza en América Central, 2008), elaborado por la Cooperación Suiza para América Central, Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y la Comisión Permanente de Contingencias (COPECO), mediante el análisis de los resultados de la modelización hidráulica con herramientas de Sistemas de Información Geográfica.

La estimación de la amenaza por inundación fluvial será determinada con la siguiente expresión:

[14] Si bien la UMGIR no es la autora del procedimiento, si es la dependencia del Gobierno Local, en conjunto con la COPECO, encargada de velar por su cumplimiento para establecer permisos para la ocupación del territorio y ordenanzas municipales.

BORRADOR

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

$$\textbf{Amenaza} = f(intensidad, probabilidad\ de\ ocurrencia)$$

Seguido, la intensidad y probabilidad de la inundación fluvial se determina de la siguiente forma:

$$\textbf{Intensidad} = f(profundidad, duración, velocidad)$$

$$\textbf{Probabilidad} = f(precipitaciones, eventos\ desencadenantes, cambio\ climático)$$

La herramienta de categorización de la intensidad de la inundación fluvial se detalla a continuación:

Tabla 6. Determinación de la intensidad de la inundación fluvial.

Nivel de intensidad	Profundidad de flujo (H), m (inundaciones estáticas)	Profundidad x velocidad de flujo, m^2/s (inundaciones dinámicas)
Alto	$H \geq 1.00$	$H \cdot v \geq 1.50$
Medio	$0.50 \leq H < 1.00$	$0.50 \leq H \cdot v < 1.50$
Bajo	$0.25 \leq H < 0.50$	$H \cdot v < 0.50$ y $H \geq 0.25$

La expresión gráfica de estas desigualdades se muestra a continuación:

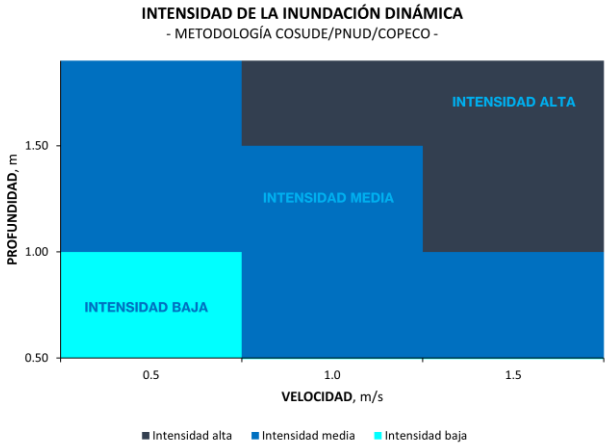


Gráfico 3. Representación gráfica de la intensidad de la inundación fluvial.

En el caso de la probabilidad de ocurrencia, esta se encuentra asociada a la frecuencia según la siguiente tabla:

Tabla 7. Determinación del nivel de frecuencia según el período de retorno.

Frecuencia	Período de retorno T_R, años
Alta	$T_R \leq 10$
Media	$10 < T_R \leq 50$
Baja	$50 < T_R \leq 200$

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

Establecida la frecuencia, los niveles de amenaza se determinan mediante la siguiente expresión:

Tabla 8. Determinación del nivel de amenaza según la frecuencia y su intensidad.

Nivel de Intensidad	Frecuencia		
	$T_R \leq 10$ (Alta)	$10 < T_R \leq 50$ (Media)	$50 < T_R \leq 200$ (Baja)
Alta	Amenaza alta	Amenaza alta	Amenaza alta
Media	Amenaza alta	Amenaza media	Amenaza baja
Baja	Amenaza media	Amenaza baja	Amenaza baja

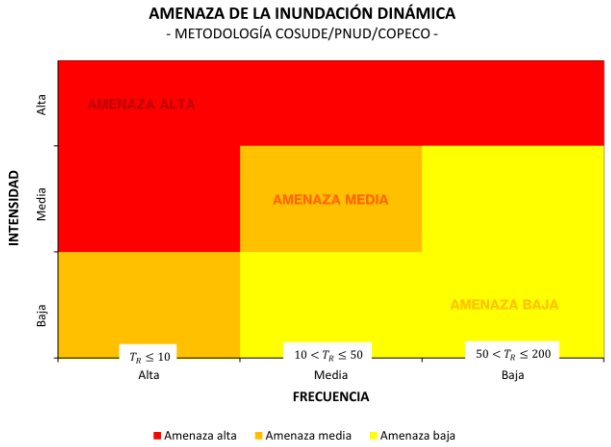


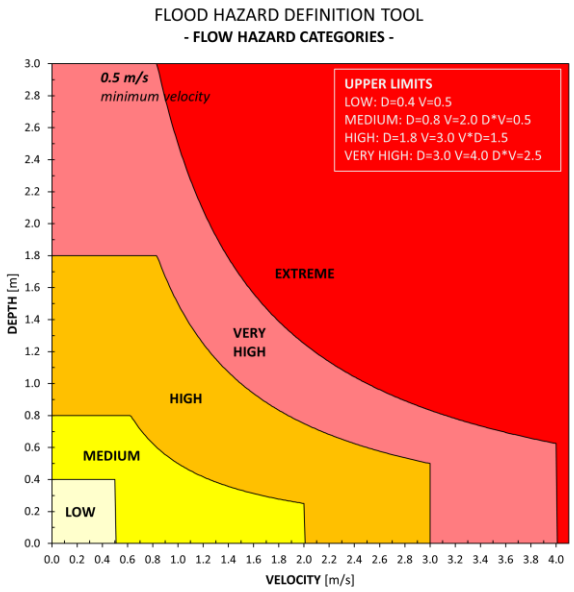
Gráfico 4. Representación gráfica de la amenaza de la inundación fluvial.

4.4.2 Categorización de la amenaza por inundación según el ARR

Adicional a ello, también se contempló la aplicación de la herramienta de categorización de la amenaza por inundación, desarrollada por el *Australian Rainfall & Runoff* a través de un reporte titulado *Appropriate Safety Criteria for People* (Australia, 2010).

El razonamiento utilizado ha sido resumido en el informe titulado *Guidance for Flood Risk Analysis and Mapping* (FEMA, 2018), en el que se detallan los criterios para definir la amenaza por inundación mediante un mecanismo bivariado, atendiendo la distribución de las profundidades y las velocidades desarrolladas por las corrientes en su cauce y bancos de desbordamiento. El siguiente gráfico, proporciona la solución gráfica de esta herramienta.

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614




```
Dim HAZARD_

if [X_] <= 0.401 and [Y_] <= 0.501 then
HAZARD_ = "LOW"

elseif [X_] <= 0.801 and [Y_] <= 2.001
and [X_] * [Y_] <=0.501 then
HAZARD_ = "MEDIUM"

elseif [X_] <= 1.801 and [Y_] <= 3.001
and [X_] * [Y_] <=1.501 then
HAZARD_ = "HIGH"

elseif [X_] <= 4.001 and [Y_] <= 4.001
and [X_] * [Y_] <=2.501 then
HAZARD_ = "VERY HIGH"

else
HAZARD_ = "EXTREME"

end if
```

Gráfico 5. Representación gráfica de la amenaza de la inundación fluvial.

El análisis de la peligrosidad de una rotura de presa será atendido con la información disponible de la geometría del terreno, nada más para poder identificar segmentos del Río Namale donde sería necesario un análisis más exhaustivo, fuera de los alcances de esta investigación.

Se utilizará el modelo FABDEM como modelo digital de terreno para describir el comportamiento hidráulico de los flujos, adoptando un valor de rugosidad de 0.057, considerado elevado para desarrollar el análisis de forma conservadora.

BORRADOR

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

5. INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA

5.1 Información climatológica

En este apartado se presentan los principales factores climáticos que condicionan el comportamiento hidrológico de la cuenca, considerando tanto los patrones regionales como los fenómenos de variabilidad climática interanual a nivel local.

Como lo es en la generalidad de las estribaciones de la *Cordillera Central*[15], y sus ramificaciones locales en el Istmo Centroamericano, la cuenca del Río Namale observa dos estaciones bien definidos: una Estación Lluviosa y una Estación Seca. En los siguientes apartados se detallan las particularidades que dan origen a esa variación en los aportes pluviales en la zona.

5.1.1 Fenómenos climáticos regionales

El clima, y con éste su distribución pluvial, está condicionado por la circulación de los Vientos Alisios del noreste, así como la exposición de las accidentadas estribaciones que finalmente deben ser superadas para transportar la humedad hasta tierra adentro.

Pese a lo estrecho del territorio hondureño, su vecindad con ambos océanos y, la identificación como tropical lluvioso, el régimen de las lluvias observa amplias variaciones, dado lo accidentado de su orografía y la orientación que sus cordilleras predominantes, aunque de no de gran altura, ofrecen a la circulación general de la atmósfera.

Esta variación espacial y temporal de la lluvia permite recurrir a la clasificación climática de *Köppen-Geiger*[16], sistema de clasificación mundialmente reconocido para categorizar los tipos de clima, considerando su influencia sobre la vegetación natural.

> *"The Köppen-Geiger classification remains one of the most well-known and widely used climate classification systems. Developed in the late 19th century by Russian-German climatologist Wladimir Köppen, and later refined by meteorologist Rudolf Geiger, this classification divides global land climates into five major classes and 30 sub-classes, based on threshold values and seasonality of monthly air temperature and precipitation."* (Beck, y otros, 2023, pág. 1)

> *"La clasificación de Köppen–Geiger sigue siendo uno de los sistemas de clasificación climática más conocidos y utilizados. Desarrollada a finales del siglo XIX por el climatólogo ruso–alemán Wladimir Köppen, y posteriormente refinada por el meteorólogo Rudolf Geiger, esta clasificación divide los climas terrestres globales en cinco clases principales y treinta subclases, basadas en valores umbral y en la estacionalidad de la temperatura y la precipitación mensuales."* (Beck, y otros, 2023, pág. 1)

BORRADOR

[15] *La Cordillera Central, también conocida como el Parteaguas Continental, es la divisoria de aguas entre las vertientes del Atlántico y el Pacífico en el Continente Americano.*
[16] www.gloh2o.org/koppen

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

Este sistema de clasificación divide los climas del planeta en cinco grupos principales (A, B, C, D y E) y múltiples subtipos, según la temperatura media del mes más frío y más cálido, la precipitación anual y su variación estacional. Cada tipo se representa mediante un código alfabético de dos o tres letras, donde la primera indica el grupo climático general (tropical, árido, templado, frío o polar), la segunda el régimen de lluvias (por ejemplo, $w = invierno\ seco$, $f = lluvioso\ todo\ el\ año$) y la tercera la temperatura del verano (a, b o c).

En la actualidad, la versión revisada por Beck, y otros (2023), es la más utilizada en estudios climáticos e hidrológicos, al ofrecer mapas de resolución espacial de 1 km² y proyecciones actualizadas para distintos escenarios climáticos. Este sistema constituye una herramienta fundamental para caracterizar el contexto climático regional, interpretar la variabilidad hidrológica y establecer criterios de diseño en proyectos de aprovechamiento hídrico.

A nivel mundial, la Clasificación Climática de Köppen-Geiger se presenta a través de la siguiente ilustración:

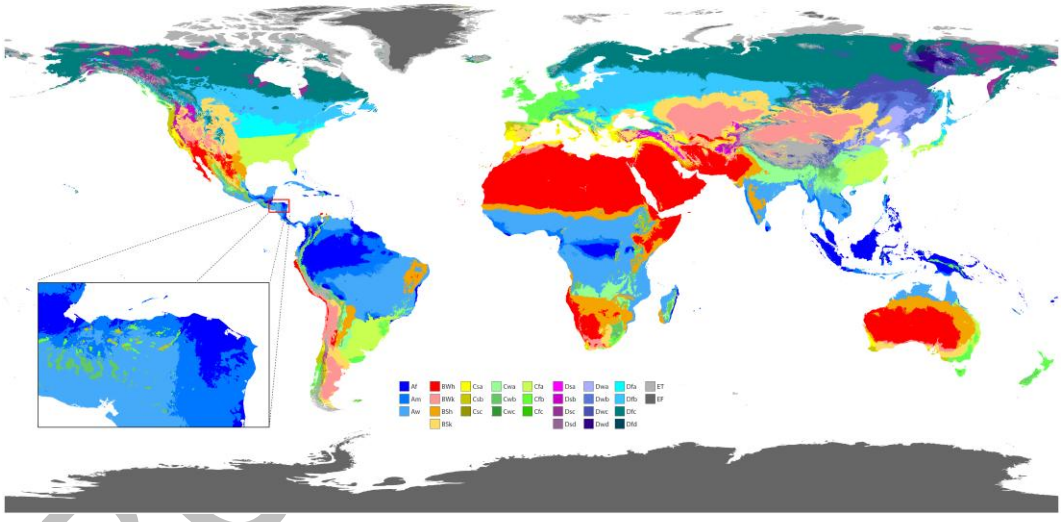


Ilustración 3. Clasificación Climática de Köppen-Geiger a escala mundial y nacional.

Ya en el caso de la Zona Oriental del país, se puede observar que el clima predominante es *Tropical de sabana (Aw)*, detallado a través de la siguiente tabla:

Tabla 9. Clasificaciones climáticas de Köppen-Geiger para el Departamento de El Paraíso.

Código	Color	Tipo de clima	Descripción
Aw		Tropical de sabana con invierno seco	Temperaturas medias anuales > 18 °C; lluvias concentradas entre mayo y octubre; estación seca de noviembre a abril.
Cwb		Templado con invierno seco y verano templado	Clima de montaña; veranos húmedos, inviernos secos; temperaturas medias de 16–20 °C.
Cwa		Templado con invierno seco y verano cálido	Temperaturas más altas que el Cwb, con un régimen de lluvias similar (verano lluvioso).
BSh		Semiárido cálido	Temperatura media anual entre 22 °C y 27 °C. Lluvias entre mayo y octubre con acumulados anuales menores a 800 mm.

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

Finalmente, a través de la siguiente ilustración, se brinda la distribución espacial de la clasificación climática predominante en la zona de estudio.

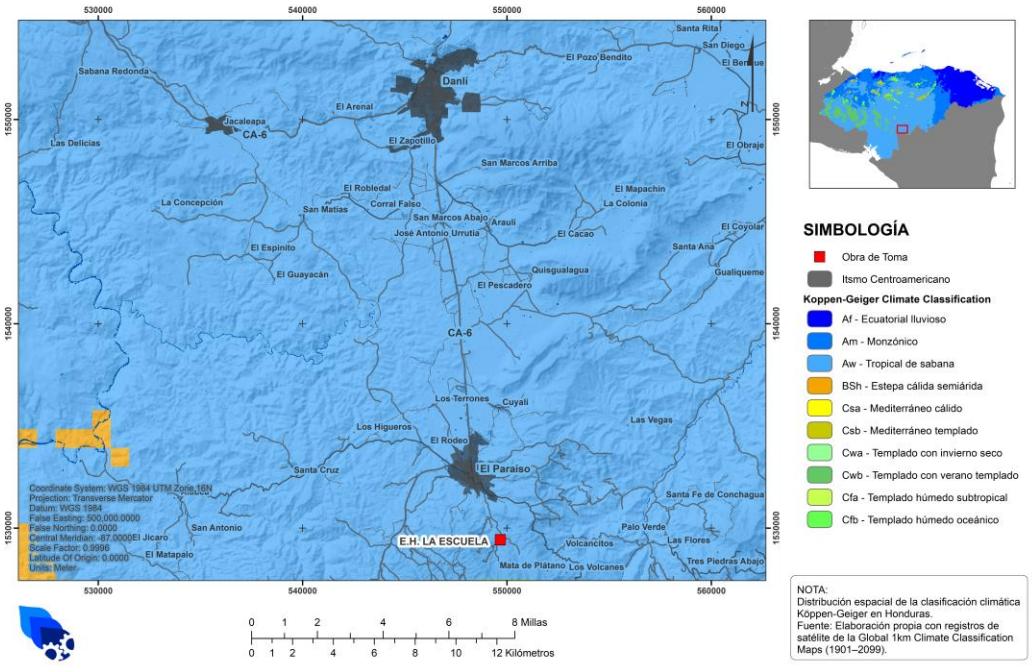


Ilustración 4. Clasificación Climática de Köppen-Geiger para el área de interés.

Los vientos alisios

Los vientos alisios son corrientes de aire predominantes y persistentes que soplan desde las altas presiones subtropicales hacia la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), como resultado del gradiente térmico ecuatorial y del efecto de Coriolis.

En el hemisferio norte, soplan del noreste al suroeste, y en el hemisferio sur, del sureste al noroeste, convergiendo en la franja tropical donde el aire cálido asciende generando nubosidad y lluvias convectivas. Esta condición se refleja en el comportamiento de las perturbaciones atmosféricas en ambos hemisferios: sentido antihorario en el hemisferio norte y sentido horario en el hemisferio sur.

Estos vientos se desarrollan dentro de la *Celda de Hadley*[17], entre aproximadamente 30° N y 30° S, y constituyen uno de los mecanismos más importantes de transporte de humedad en los trópicos. En Centroamérica y el Caribe, su persistencia explica la marcada estación seca de los primeros meses del año y la advección de aire húmedo que contribuye al inicio de la estación lluviosa cuando la ZCIT se desplaza hacia el norte.

En conclusión, los vientos alisios son los responsables del desplazamiento de la ZCIT.

BORRADOR

[17] *Las Celdas de Hadley, junto con las de Ferrel y las polares, son las encargadas de la circulación atmosférica a escala planetaria. Fuente: NOAA*

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

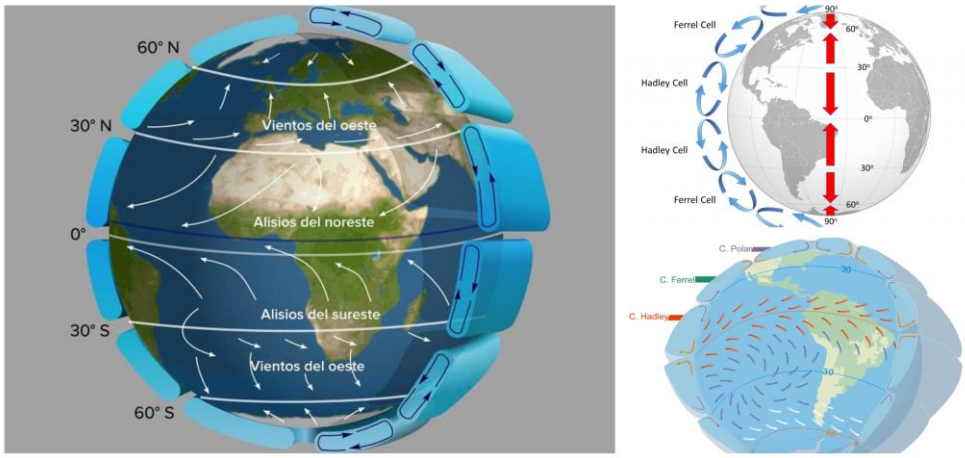


Ilustración 5. Esquema de las celdas atmosféricas en los hemisferios terrestres.

La Zona de Convergencia Intertropical

El inicio[18] de la temporada lluviosa en Honduras está asociada al arribo hasta nuestras latitudes de la Zona de Convergencia Intertropical, responsable del transporte de humedad desde el Mar Caribe hasta el interior del territorio nacional.

En el territorio hondureño, localizado a una latitud de 15°, la presencia de la ZCIT se registra oficialmente desde el mes de mayo, desplazándose hasta una latitud de 20° en el hemisferio norte, cerca de la península de Yucatán, que es cuando en Honduras se experimenta una breve merma en las lluvias, brindando ese característico comportamiento bimodal del período lluvioso en el centro, sur y oriente hondureño.

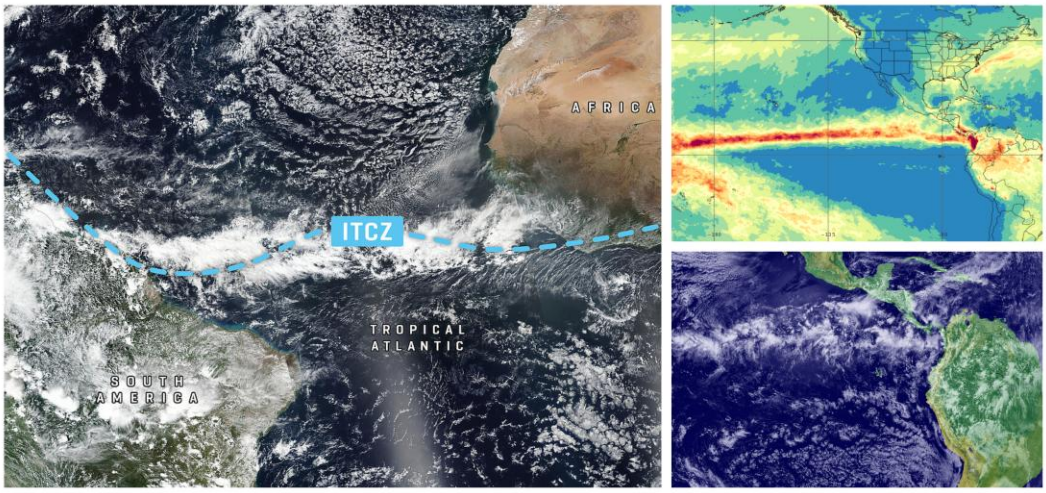


Ilustración 6. Zona de Convergencia Intertropical y sus diferentes manifestaciones.

Posteriormente, la ZCIT inicia su descenso hasta alcanzar la latitud 15°, al Sur del ecuador. Este declive latitudinal da fin al período lluvioso, y con ello, la temporada de huracanes del

[18] *En Honduras, la temporada lluviosa inicia oficialmente en mayo y concluye en noviembre.*

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

Mar Caribe, alrededor del mes de noviembre, donde los aguaceros disminuyen significativamente, por lo que, a partir de este mes, los ingresos de humedad al país únicamente quedan a merced de los frentes fríos y lluvias dispersas ocasionales.

En términos generales, las zonas central, occidental, oriental y sur son las que más se encuentran sometidas a las lluvias que trae consigo la ZCIT. Por su parte, la zona norte de Honduras manifiesta un régimen pluvial significativamente distinto, donde los aportes de los frentes fríos son los responsables de esta diferencia en la distribución de las lluvias.

Los frentes fríos

Los frentes fríos se asocian a sistemas meteorológicos de tipo *extra tropical* asociados al desplazamiento de masas de aire polar hacia el sur, interactuando con las masas de aire caliente y húmedas del Caribe.

En Honduras, se manifiestan durante los meses de noviembre a marzo, caracterizados por ser los responsables de los descensos de temperatura en nuestro país, y de persistentes lluvias que, si bien no son tan intensas como las asociadas a huracanes, tormentas tropicales o tormentas de tipo convectivo, estas logran establecerse sobre áreas significativamente mayores, afectando principalmente a ríos con áreas de drenaje de moderadas a grandes.

Las cuencas de ríos pequeños, aunque manifiestan una respuesta a estas precipitaciones, por lo modesto de sus intensidades, en general no logran desarrollarse crecidas como las que podrían manifestarse como respuesta de tormentas con origen convectivo.

Las ondas del este

El gradiente térmico entre el Sahara y la zona costera del Golfo de Guinea, en el continente africano, es responsable del origen de las ondas del este, que se desplazan hacia la zona occidental del Océano Atlántico, en la parte baja de la tropósfera, circulando entre 5° y 15° Norte.

Se estima que cerca del 80% de todos los huracanes intensos se originan por las Ondas del Este Africanas, una proporción mucho mayor que la observadas para ciclones más débiles, con un valor de 58%. Huracanes de gran intensidad (categoría 3 o más, en la escala Saffir-Simpson) muestran un porcentaje de 83% como atribuible al origen en el continente africano (Landsea, 1992, pág. 1711).

Se desplaza hacia la zona occidental del Atlántico transportado por una zona de corrientes en la parte baja de la troposfera, circulando entre 5° y 15° Norte. Se cree que el 58% de las tormentas tropicales y huracanes menores son originados por las Ondas del Este, mientras que para la generación de huracanes de gran intensidad (categoría 3 o más en la escala Saffir-Simpson), ese porcentaje estaría sobre el 83% (Landsea, 1992, pág. 1703). Muchas de estas depresiones pueden cruzar al Océano Pacífico.

BORRADOR

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

El Fenómeno del Niño

El Niño Oscilación Sur (ENOS) es un fenómeno que engloba dos componentes. Durante el siglo XIX, unos pescadores peruanos percibieron que la normal corriente fría que se desplazaba hacia el norte de sus costas cesaba en pro de otra corriente más cálida y que avanzaba hacia el sur. Esto producía un anómalo aumento de temperatura en el Pacífico. Le llamaron El Niño porque este evento sucedía en diciembre, por lo que fue asociado al nacimiento de Jesús, para los cristianos.

Ya en el siglo XX, se descubrió un cambio asociado a las presiones atmosféricas de los océanos Pacífico e Índico. Concretamente con el aumento de presión en el Pacífico, tiende a haber baja presión en el Índico. A este fenómeno se le denominó Oscilación del Sur y provoca la circulación del aire situado en altura, desde el oeste hacia el este del Pacífico. Por esto último, el ENOS *tiende a suprimir la actividad de los Huracanes provenientes del Atlántico* y, de forma contraria, *hace aumentar esa actividad en el Pacífico*.

De esta forma, existe un componente de temperatura asociada al agua del mar (EN) y, por otro, el componente asociado a las presiones atmosféricas (OS). El ENOS suele manifestarse entre diciembre y marzo. Dura un período entre 6 a 18 meses y se repite cada 2 a 7 años.

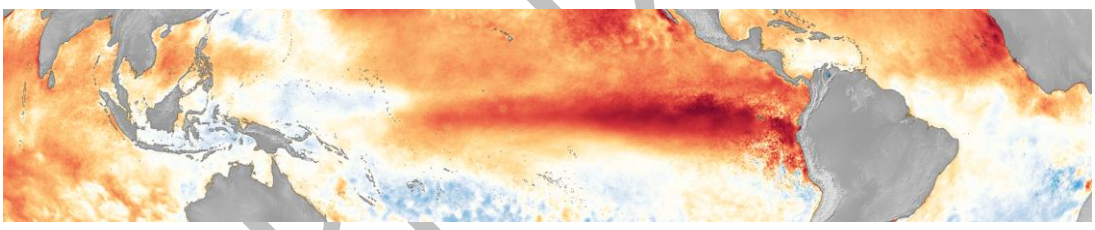


Ilustración 7. Patrón de variación de las temperaturas en el Océano Pacífico que sirven de umbral para categorizar el Fenómeno de El Niño Oscilación Sur (ENOS).

La variación de los patrones de temperaturas en el Océano Pacífico establecidas como *anomalías de temperatura en la superficie* (SST Anomalía), definida por la siguiente expresión:

$$SST_{Anomalía} = SST_{Observada} - SST_{Promedio}$$

Estas anomalías han sido documentadas desde principios del siglo pasado, detallándose a través del siguiente gráfico:

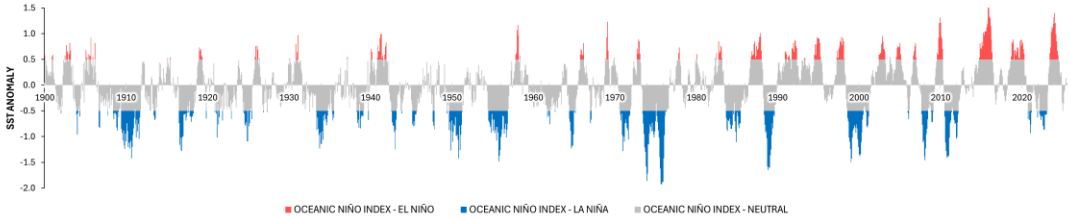


Gráfico 6. Variación de la anomalía de temperaturas en el Océano Pacífico a lo largo del último siglo.

BORRADOR

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

En el caso de nuestra zona de interés, adelantándonos a la presentación de registros de lluvia mensual, mostramos la correspondencia existente entre períodos con alta actividad lluviosa, asociados a la presencia de La Niña, y la condición opuesta cuando se manifiesta El Niño.

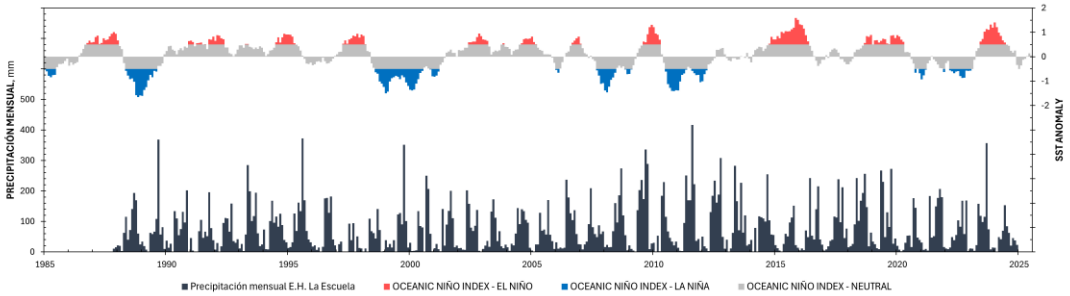


Gráfico 7. Variación de la anomalía de temperaturas en el Océano Pacífico a lo largo del último siglo.

5.1.2 Registros pluviales locales

Con el fin de comprender climatológicamente la superficie de drenaje de la quebrada, sobre la cota 925 m s.n.m., y tener un mejor panorama de los aportes pluviales de la superficie de aportación, se ha recurrido a los registros de las estaciones pluviométricas y climatológicas más próximas al área de drenaje de interés, procurando conocer el régimen pluvial de la totalidad del área de drenaje.

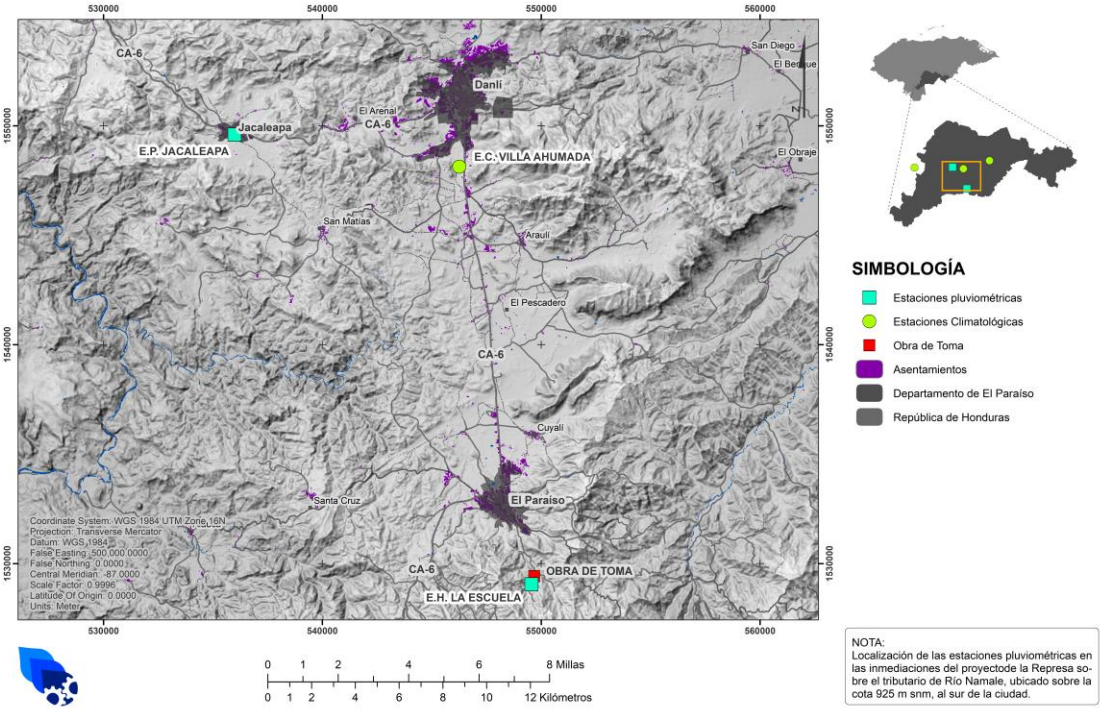


Ilustración 8. Localización de las estaciones pluviométricas más relevantes en las inmediaciones del área de drenaje.

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

La ilustración anterior, detalla la ubicación de las estaciones en las inmediaciones de la superficie de aportación. Es importante mencionar que la estación con registros de corta duración más próxima al proyecto es la Estación Climatológica Villa Ahumada[19].

En lo concerniente a registros pluviométricos, la Estación Pluviométrica de Jacaleapa[20] se localiza a 24 kilómetros del sitio, sin embargo, posee los registros de precipitación diaria más extensos, con cerca de 38 años de información. Finalmente, los registros hidrometeorológicos han sido proporcionados por la Estación Hidrometeorológica La Escuela[21], con registros que iniciaron en octubre de 2023.

Los registros pluviales diarios de las dos principales estaciones de observación se detallan a través del siguiente gráfico:

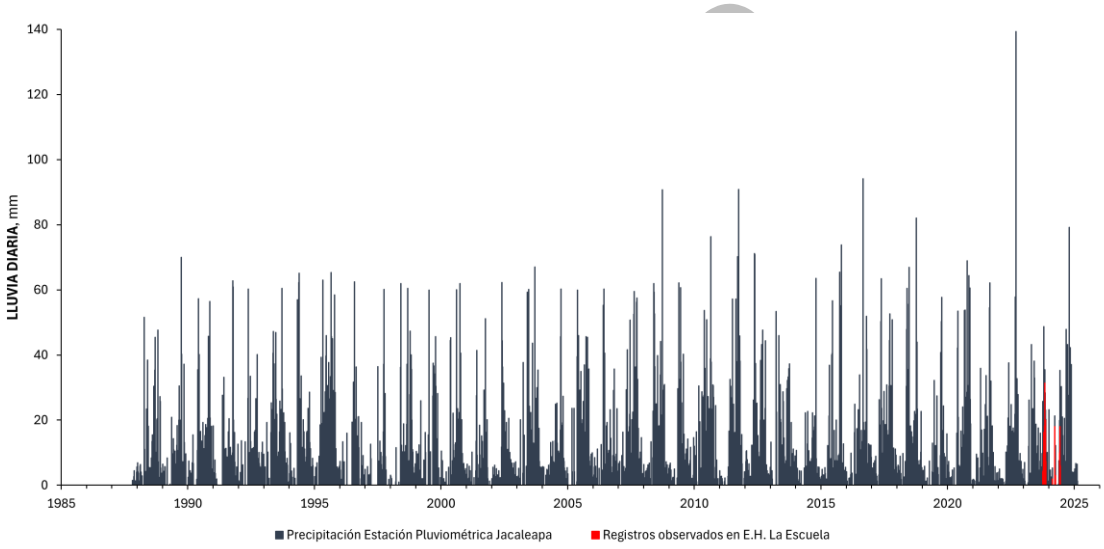


Gráfico 8. Precipitación diaria en las estaciones con registros de lluvia utilizados.

Por su parte, el gráfico siguiente resume los estimados de precipitación media mensual en la Estación Pluviométrica de Jacaleapa[22], localizada al oeste Danlí, a una elevación más cerca de las condiciones de la ubicada en la montaña de El Paraíso que de Danlí:

[19] La Estación Climatológica Villa Ahumada se ubica en las coordenadas UTM WGS84 16P 546256 m E, 1548133 m N y 774 m s.n.m. Fuente: Manual de Referencias Hidrológicas de Honduras.
[20] La Estación Pluviométrica de Jacaleapa se ubica en las coordenadas UTM WGS84 16P 535994 m E, 1549595 m N y 820 m s.n.m. Fuente: Centro de Estudios Atmosféricos, Oceanográficos y Sísmicos (CENAOS).
[21] La Estación Hidrometeorológica La Escuela se ubica en las coordenadas UTM WGS84 16P 549558 m E, 1529058 m N y 990 m s.n.m. Fuente: Estación Meteorológica Davis DWS-001.
[22] La Estación Pluviométrica de Jacaleapa se ubica en las coordenadas UTM WGS84 16P 270392 m E, 1642810 m N.

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

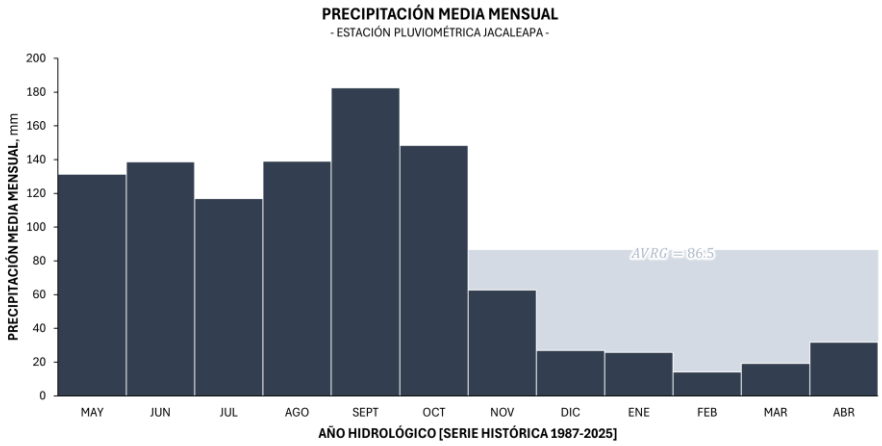


Gráfico 9. Precipitación media mensual en la Estación Pluviométrica de Jacaleapa.

Parte del proceso de traslado de los registros pluviales de la Estación Pluviométrica de Jacaleapa implica realizar un análisis de doble masa para establecer la correspondencia entre la relación entre los acumulados de las estaciones con registros diarios. Adicional a ello, se verificó la información de los registros de precipitación de la NASA, ofreciendo una valoración adicional al análisis.

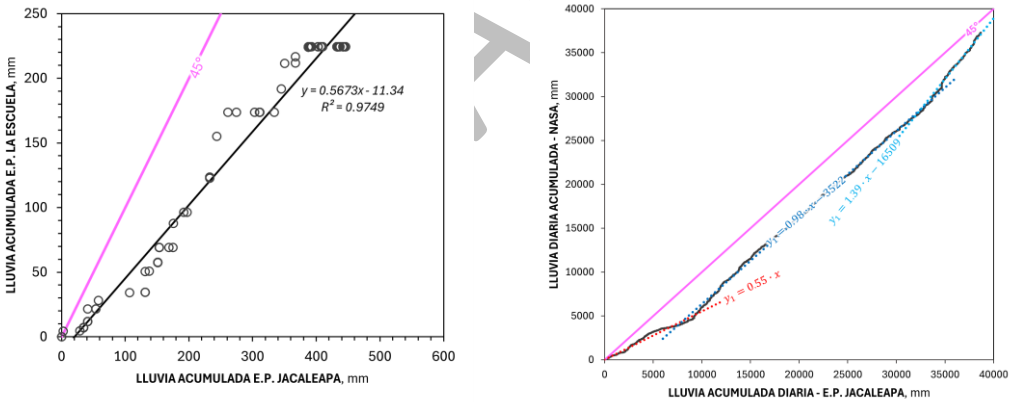


Gráfico 10. Análisis de doble masa entre los registros diarios de lluvia en Jacaleapa y La Escuela (izq); análisis de doble masa de los registros diarios satelitales y la observación en Jacaleapa (der).

Los registros pluviales medios mensuales, ajustados hasta la montaña donde está el proyecto, estaciones se resumen a través de la siguiente tabla:

Tabla 10. Registros pluviométricos medios mensuales de las principales estaciones de interés.

ESTACIÓN	CÓDIGO	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	ANUAL
Jacaleapa	*56.007*	131	139	117	139	183	149	63	27	26	14	19	32	**1039**
La Escuela	*DWS-001*	116	126	103	122	166	129	55	24	23	14	17	29	**923**

Fuente: CENAOS, NASA, DWS-001.

La distribución de los aportes pluviales promedio a nivel mensual, ajustados hasta el sitio del proyecto, se muestran a través del siguiente gráfico:

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

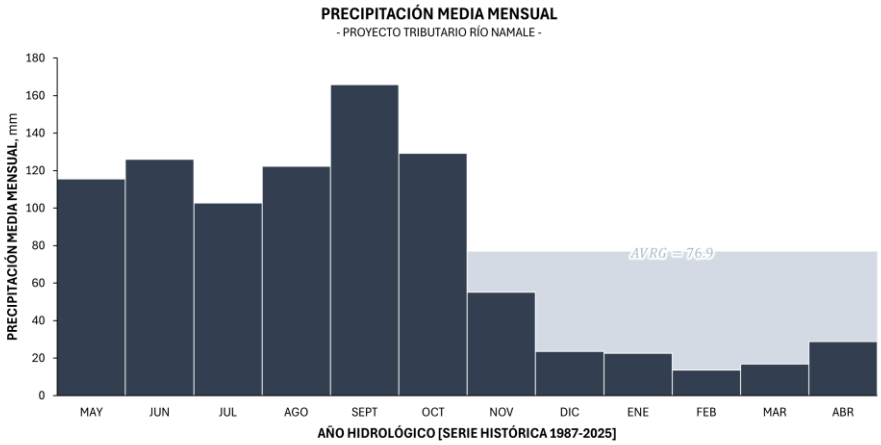


Gráfico 11. Precipitación media mensual en la Estación Pluviométrica de Jacaleapa.

Si bien los acumulados anuales de precipitación muestran una ligera reducción entre lo observado en Jacaleapa, en contraste con la zona del proyecto, esto podría estar asociado a que el proyecto se encuentra en la zona de sotavento o sombra de lluvia de la montaña, por lo que zonas en dirección ligeramente hacia el norte podrían mostrar acumulados por sobre los observados en la zona del proyecto; esto podría responder a las condiciones relativamente más cálidas y secas de Ciudad de El Paraíso, en contraste con el sitio del proyecto. Esta situación se ejemplifica a través de las siguientes ilustraciones:

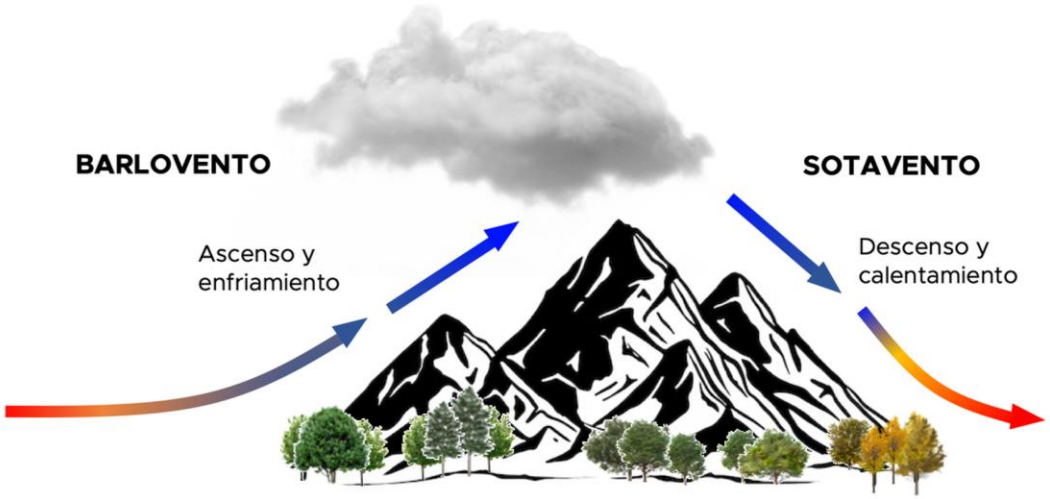


Ilustración 9. Condiciones de humedad de los vientos bajo ciertas condiciones orográficas.

Adicional a ello, se ha comprobado esta condición de merma en los acumulados anuales, en el sitio de interés, a través de los registros estimados en el Balance Hídrico de Honduras en régimen natural (UNAH; SERNA, 2014). Adicional a ello, la data satelital de la NASA también refleja esta merma con respecto a los registros en la Estación Pluviométrica de Jacaleapa, por lo que podemos concluir que la condición de sombra de lluvia está presente en el área de análisis, apreciándose con la orientación de los vientos en la siguiente ilustración:

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

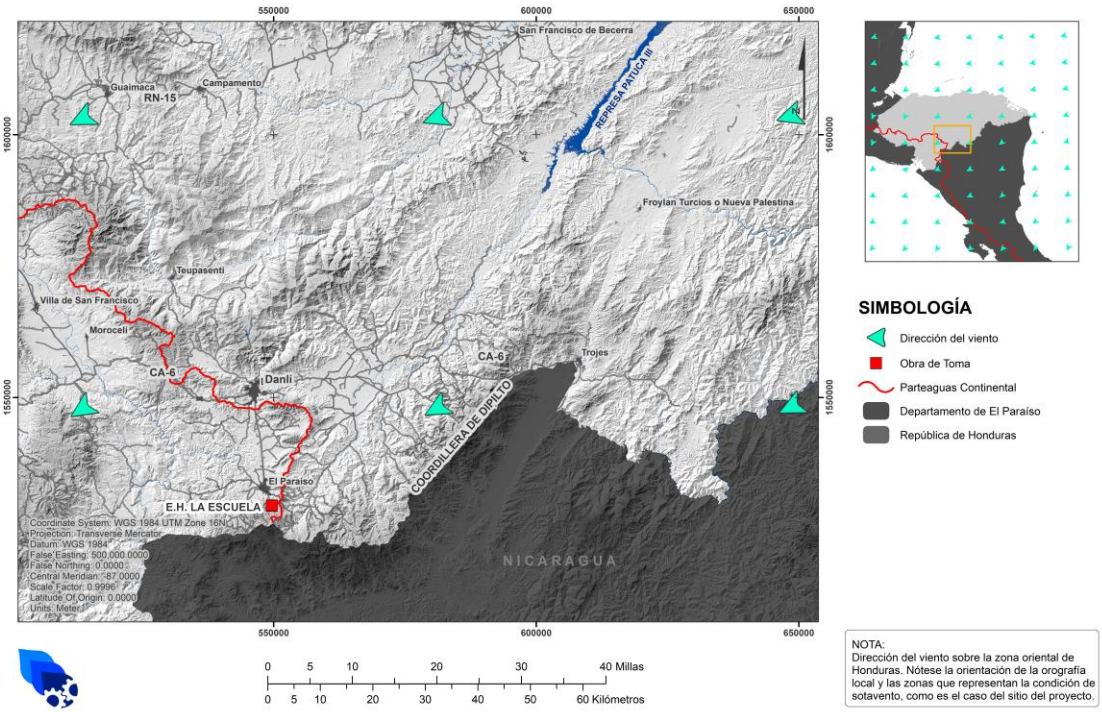


Ilustración 10. Dirección del viento en la zona oriental del país. Nótese la ubicación del proyecto en sotavento.

La distribución de los aportes pluviales, en términos generales, muestra un comportamiento que podría asociarse al observado en la Zona Sur de nuestro país, donde el comportamiento de las lluvias manifiesta un comportamiento bimodal, siendo los meses de junio y septiembre los que manifiestan los mayores acumulados mensuales de lluvia en el área de contribución.

El régimen pluvial observado en la Zona Sur del territorio hondureño revela que, durante seis o siete meses, se registra un acumulado de aproximadamente el 83% de la precipitación media anual, situación que sustenta la versión de los lugareños sobre la frecuencia, de la época del año, donde las inundaciones son más recurrentes.

A partir de diciembre, el comportamiento del régimen pluvial posee una limitada influencia de los frentes fríos que, en ocasiones, logran extenderse hasta el occidente del país. Es hasta el mes de abril que los aportes pluviales nuevamente muestran la influencia de la Zona de Convergencia Intertropical, estableciendo a mayo como el mes que da inicio al período lluvioso.

Este acumulado se encuentra en un 42% por debajo del promedio nacional que, si consideramos la ubicación del oriente hondureño con respecto al arribo y concentración de la humedad, puede considerarse como una región con modestos aportes acumulados, aunque la mayoría de estos se ubiquen en casi la mitad del año.

En la ilustración siguiente, nótese cómo el parteaguas continental limita el avance de la humedad hacia el oeste:

BORRAD

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

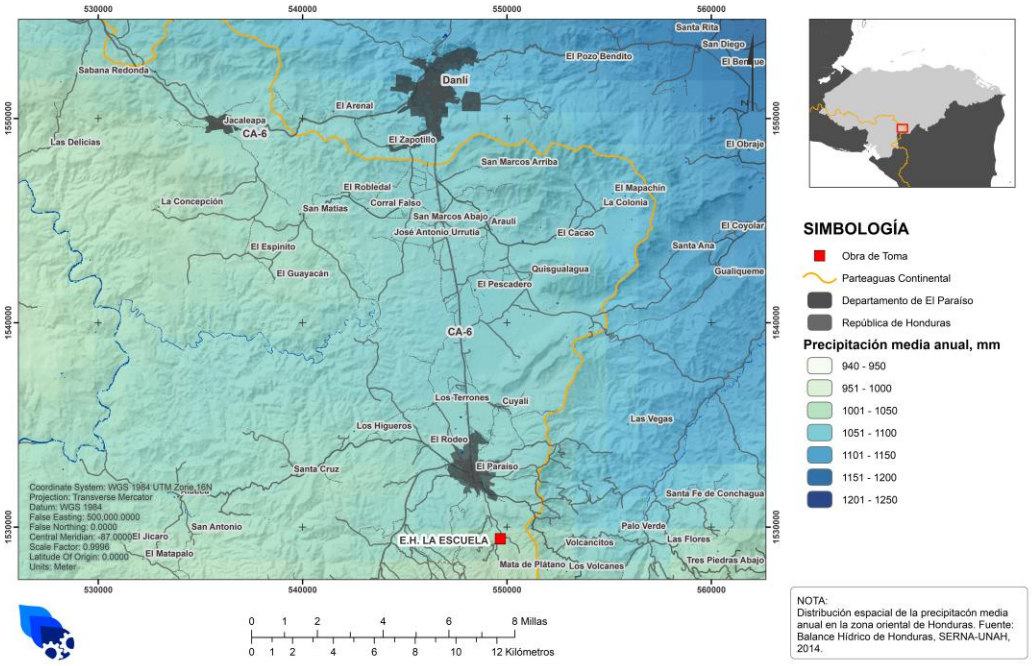


Ilustración 11. Distribución espacial de la precipitación media anual sobre la zona oriental del país.

Las masas húmedas provenientes del Mar Caribe deben recorren unos 350 kilómetros, además de superar los 1350 m s.n.m. de la Cordillera de Dipilto, donde las descargas de humedad, en condición de barlovento, quedan del otro lado de la montaña. Esta situación podría ser la respuesta a la condición relativamente seca de la zona, en comparación con el promedio nacional.

De esta forma, adecuando los registros de la Estación Pluviométrica Jacaleapa hasta el sitio del proyecto, confirmando mediante tres mecanismos diferentes la condición de sotavento del área de interés, en el sector oeste de la montaña, podemos resumir los acumulados de precipitación anual a través del siguiente gráfico:

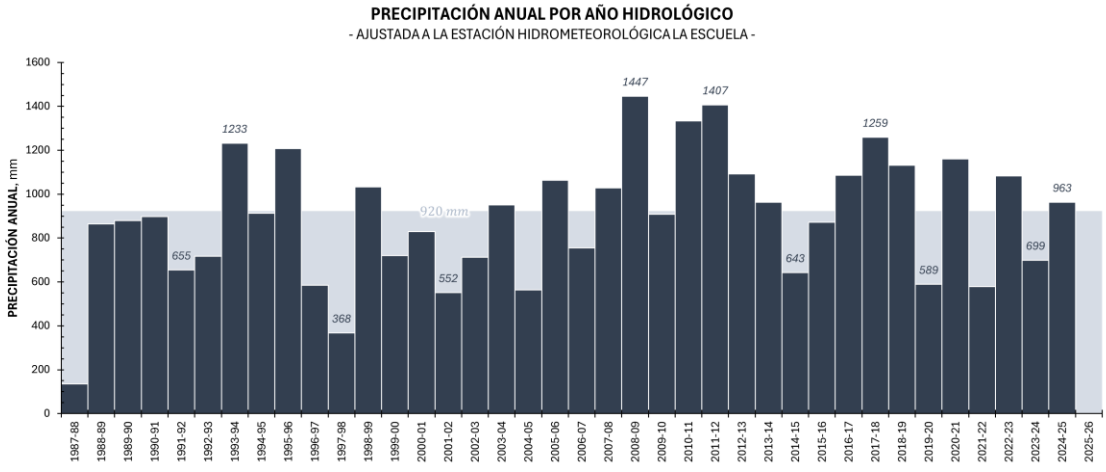


Gráfico 12. Precipitación anual por año hidrológico ajustado a la Estación Hidrometeorológica La Escuela.

BORRADOR

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

5.1.3 Análisis estadístico de los percentiles[23] de lluvia diaria

Adicional a ello, se ha realizado un análisis estadístico de los *percentiles diarios* de precipitación acumulada a lo largo de un año hidrológico promedio, facilitando la interpretación de la distribución estadística de las lluvias en la cuenca. A través de esta técnica se establece una base de comparación que permite evaluar la frecuencia relativa con la que ocurren distintos niveles de precipitación, desde los más frecuentes hasta los eventos más atípicos, estos últimos de mayor impacto.

Los percentiles bajos evidencian los días con acumulados de lluvias con menor espesor, mientras que los percentiles altos identifican los eventos con los mayores aportes acumulados, asociados generalmente a tormentas con la capacidad de aportar los mayores volúmenes de escorrentía. Esta clasificación estadística, asociada a percentiles de interés, también contribuye a distinguir las fases del año con mayor potencial de generación de caudales significativos y aquellas que son características del período de estiaje, tal como se puede apreciar en el Gráfico 13.

En términos prácticos, el análisis de percentiles permite construir un perfil representativo del comportamiento pluviométrico a lo largo de un ciclo hidrológico característico, útil para la calibración del modelos lluvia-escorrentía mediante el SMA, así como la programación de la operación hidráulica del embalse conforme a las condiciones esperadas de aporte.

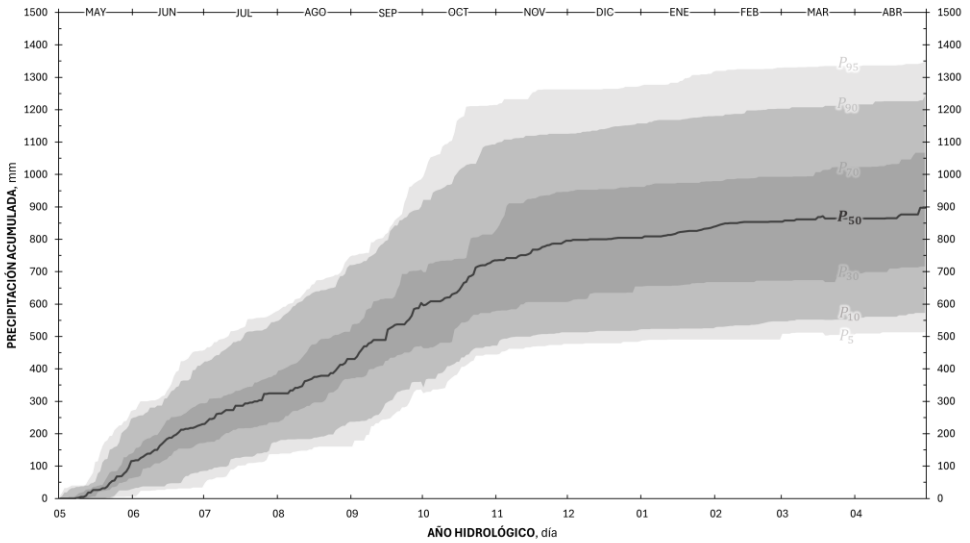


Gráfico 13. Percentiles de la precipitación acumulada para un año hidrológico promedio.

[23] Los percentiles son la representación de un conjunto de datos en 100 partes iguales, por lo que cada uno de los percentiles indica el valor que representan cierto porcentaje de observaciones. En otras palabras, el percentil representa un valor que no se supera en un porcentaje específico del tiempo dentro de un período de registro.
Como una referencia al lector, el P_{10} podría interpretarse como el valor de precipitación acumulada diaria que es superado el 90% de los días dentro del periodo analizado, mientras que el P_{90} es el valor de precipitación que sólo es superado el 10% de los días del período analizado.

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

El anterior gráfico detalla la evolución de la precipitación acumulada diaria a lo largo de un año hidrológico promedio en el área de interés, expresada en percentiles que describen la variabilidad interanual de los acumulados diarios. La línea central P_{50} indica el comportamiento medio de la lluvia anual, mientras que las bandas sombreadas delimitan los rangos comprendidos entre los percentiles $P_5 - P_{95}$, evidenciando la dispersión y la magnitud de los extremos pluviométricos analizados.

Se observa que el incremento más pronunciado de la precipitación ocurre entre mayo y octubre, coincidiendo con la estación lluviosa regional. Durante este periodo, los percentiles superiores $P_{70} - P_{95}$ muestran una fuerte pendiente, lo que sugiere alta variabilidad e incidencia de eventos de lluvia intensa. En contraste, entre noviembre y abril, las curvas tienden a estabilizarse, reflejando el predominio de condiciones secas o de escasa contribución pluviométrica.

Este análisis ha constituido el marco de referencia para la modelización hidrológica, identificando los períodos críticos de aporte y los márgenes de variabilidad que condicionan la generación de escorrentía en la cuenca. Asimismo, los percentiles superiores pueden emplearse como referencia para la evaluación de escenarios de diseño o de recarga, comúnmente utilizados en estudios de aprovechamiento hídrico.

Algunos de los años hidrológicos más representativos se detallan a continuación, utilizando como referencia la distribución de la precipitación acumulada de un año hidrológico, asociado a los percentiles característicos P_5, P_{10}, P_{30}, P_{50}, P_{70}, P_{90} y P_{95}.

RADOR

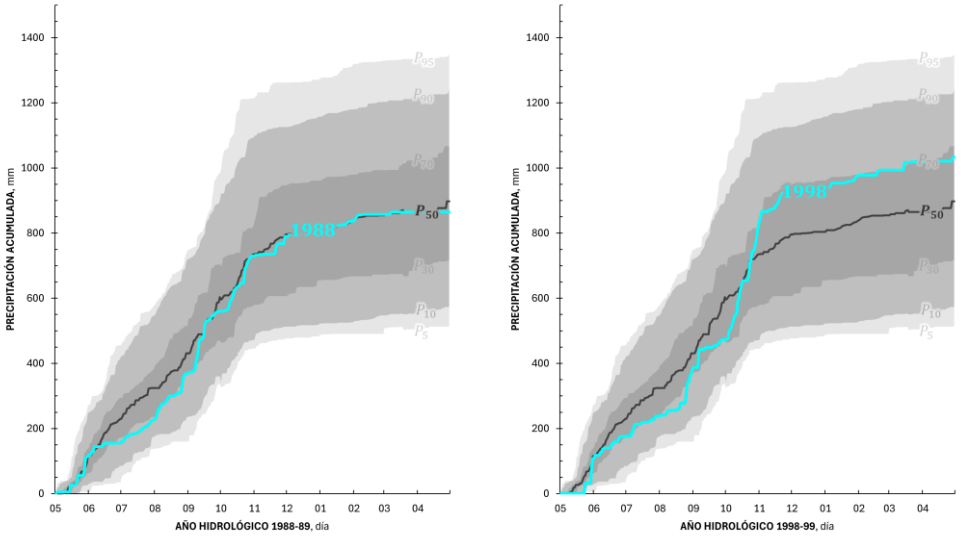


Gráfico 14. Comparación de la evolución de diferentes ciclos hidrológicos en referencia al ciclo hidrológico característico ajustados a la Estación Hidrometeorológica La Escuela. Ciclo hidrológico 1988-89 y 1998-99.

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

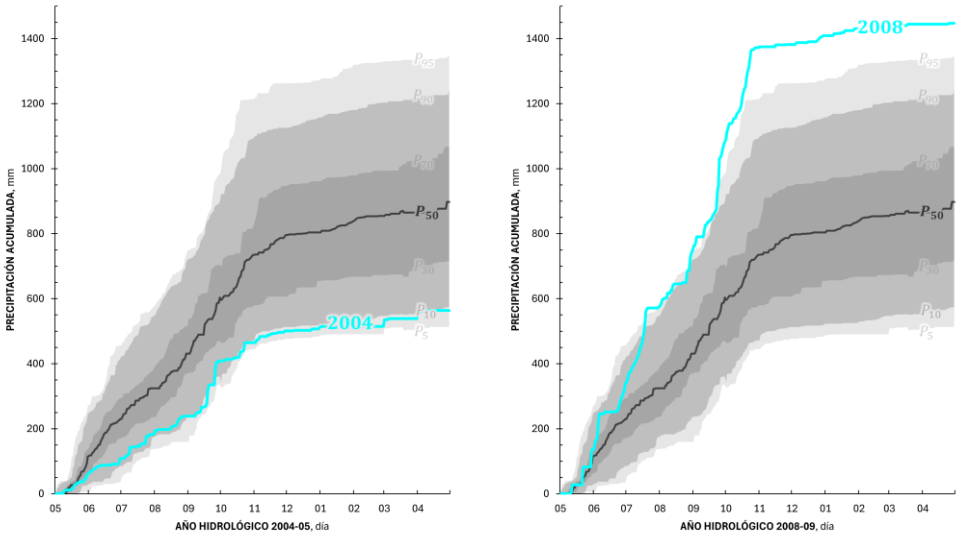


Gráfico 15. Comparación de la evolución de diferentes ciclos hidrológicos en referencia al ciclo hidrológico característico ajustados a la Estación Hidrometeorológica La Escuela. Ciclo hidrológico 2004-05 y 2008-09.

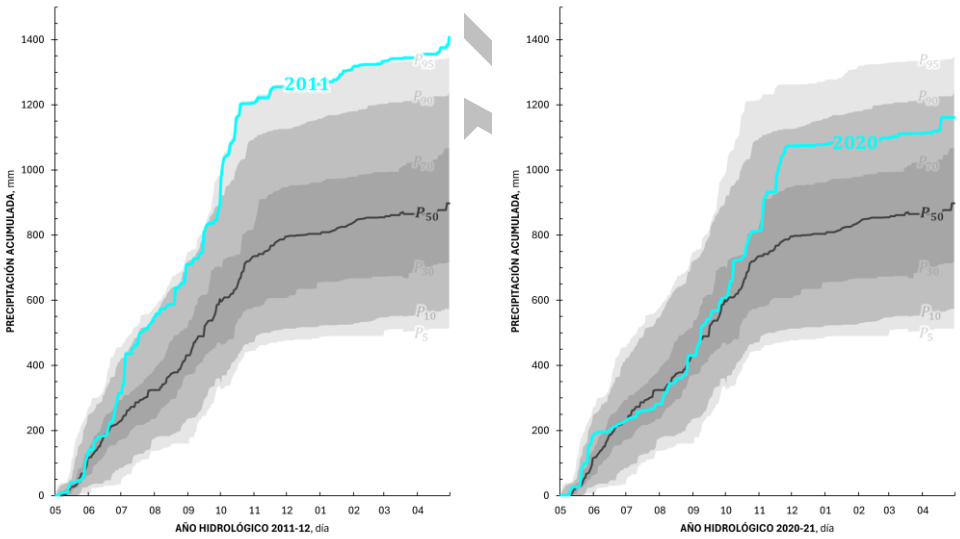


Gráfico 16. Comparación de la evolución de diferentes ciclos hidrológicos en referencia al ciclo hidrológico característico ajustados a la Estación Hidrometeorológica La Escuela. Ciclo hidrológico 2011-12 y 2020-21.

5.1.4 Registros de temperatura media mensual

Por su parte, los registros de temperatura nos permiten identificar los patrones de lluvia que desencadenan en comportamientos muy diferentes en el desarrollo de las tormentas: las temperaturas altas, asociadas a la época seca, ocasionan mayor incremento en la evapotranspiración.

Esta incorporación de humedad a la atmósfera que logra alcanzar desarrollos verticales repentinos, apoyados por cambios bruscos de presión y temperatura, se materializan en la

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

formación de nubes de tipo *cumuliforme*[24] en precipitaciones intensas que podrían tener un radio de acción de hasta 10 kilómetros (Emanuel, 1994).

De igual forma, en el caso de la temperatura a nivel medio mensual, se detalla a través de la siguiente tabla:

Tabla 11. Registros de temperatura media mensual de las principales estaciones de interés.

ESTACIÓN	CÓDIGO	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	ANUAL
Jacaleapa	*56.007*	26.8	25.2	24.7	25.0	24.7	24.1	23.4	22.9	23.1	24.1	25.7	27.3	**24.7**
La Escuela	*DWS-001*	25.6	24.0	23.5	23.8	23.5	22.8	22.2	21.7	21.8	22.8	24.4	26.1	**23.5**

Fuente: DSW-001 y correlación de temperaturas mediante gradiente altitudinal.

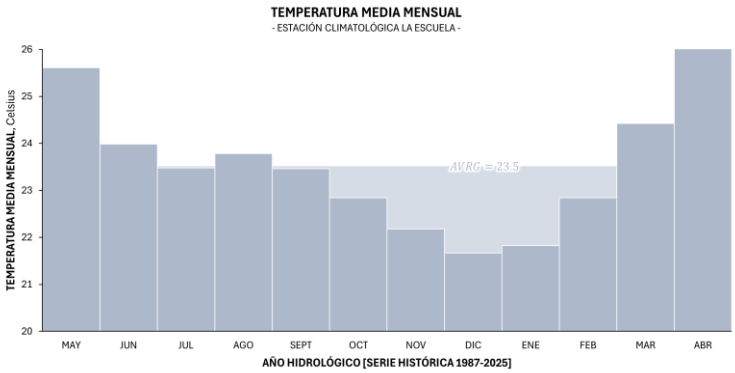


Gráfico 17. Distribución media mensual de los registros de temperatura en la superficie de interés.

Como puede observarse, en la proximidad de los meses de diciembre y enero, las temperaturas bajan al mínimo del promedio anual, como consecuencia del arribo de los frentes fríos, responsables de algunos aguaceros aislados, que con frecuencia pueden persistir a lo largo de algunos días.

En vista que el origen y evolución de los fenómenos que pueden desarrollarse en la zona no necesariamente sólo pueden ubicarse durante el período lluvioso y, por el tamaño del área de drenaje, los eventos que pueden provocar una respuesta significativa de la corriente fluvial se asocian más a los de tipo convectivo, donde las temperaturas y cambios súbitos de presión asociados a estas son el origen.

Como una referencia de la distribución espacial de la temperatura media anual a lo largo de toda la superficie de drenaje, y sus alrededores, se ha recurrido a una herramienta de interpolación espacial, mediante la estimación del *gradiente adiabático de temperatura*[25], detallado en la siguiente expresión:

$$T_{x,y} = T_{REF} + \nabla \cdot \left(Z_{x,y} - Z_{REF}\right)$$

[24] Cumulus congestus, cumulunimbus y cumulus mammatus forman parte de la categoría cumulus que representan patrones de convección con alto potencial de descarga pluvial.

[25] El gradiente adiabático es la variación de temperatura que experimentan las masas de aire en movimiento vertical. En condiciones promedio disminuye 6.5 °C por cada 1000 m (-0.65 °C/100m). Sin embargo, la humedad atmosférica afecta este gradiente.

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

BORRAR

, donde $T_{x,y}$ Variación espacial de la temperatura media anual, $°Celsius$
T_{REF} Temperatura a una elevación de referencia, $°Celsius$
∇ Gradiente adiabático de temperatura, $°Celsius/m$
$Z_{x,y}$ Elevación del modelo digital de terreno, $m\ .\ s.n.m.$
Z_{REF} Elevación de referencia, $m\ s.n.m.$

La expresión gráfica de la relación entre las temperaturas medias mensuales y las elevaciones se detalla en el siguiente gráfico:

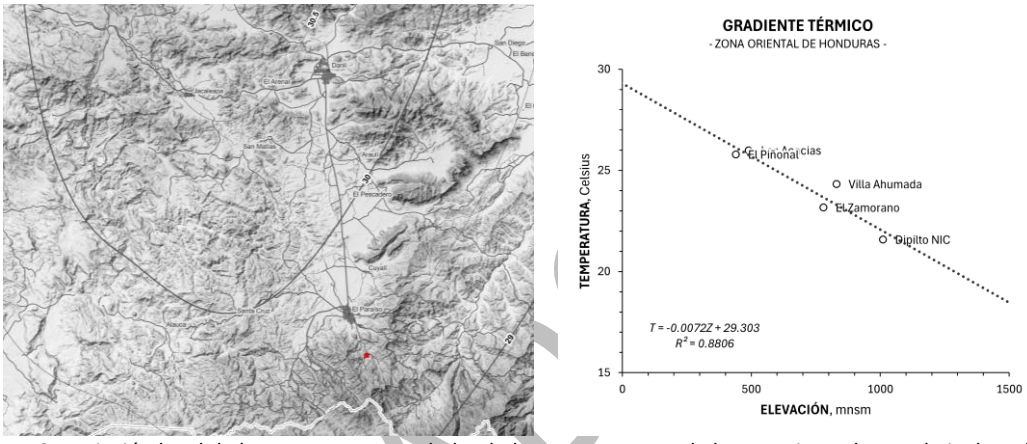


Gráfico 18. Variación local de la temperatura trasladando las temperaturas de las estaciones hasta el nivel medio del mar (izquierda) y variación de la temperatura media anual con respecto a la elevación (derecha).

Finalmente, el resultado de las variaciones de temperatura en las áreas de drenaje confirma lo que se ha observado y analizado con los gradientes de temperatura regional, tal como se muestra a continuación:

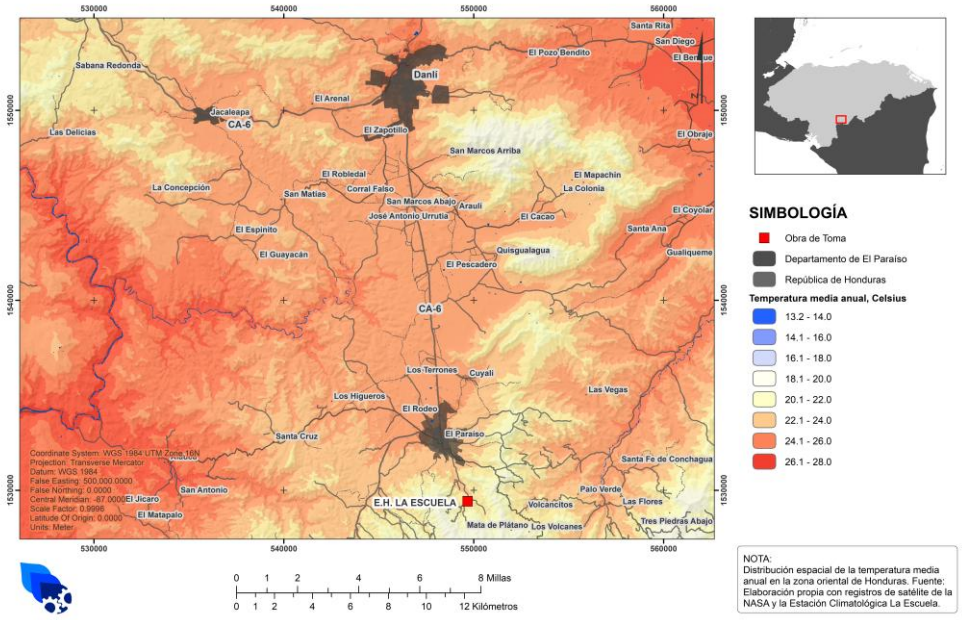


Ilustración 12. Distribución espacial de la temperatura en la zona. Fuente: Elaboración propia.

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

Una breve revisión de la anterior ilustración nos confirma la apreciable reducción en la temperatura en la zona del proyecto, que se vuelve aún más relevante si tomamos en consideración que la vegetación local brinda un mejor resguardo de la radiación solar, por lo que el balance de humedad de la pequeña superficie de aportación se vuelve más sensible a la presencia de cobertura forestal sobre ella.

5.2 Registros hidrométricos

Si bien los registros pluviales nos ofrecen un panorama enriquecedor, con los que es posible asociar la frecuencia y estacionalidad de las crecidas, la medición de los aportes fluviales de una corriente representa el registro de mayor cuantía para la calibración de un modelo lluvia-escorrentía.

Frente a ello, desde el inicio[26] del proyecto se consideró el adecuar las condiciones de la obra de toma, ya que reunía características que superaban las condiciones hidráulicas para la medición de la corriente, especialmente con los aportes durante el estiaje.

Previo a su adecuación, la obra de toma se encontraba en condiciones de deterioro, en especial, donde se localiza el rebose de esta, por lo que se tomó la decisión de restaurarla a una condición tal que su geometría permitiera de forma regular conocer los niveles de la superficie del agua en el pequeño reservorio, establecidos a través de dos escalas limnimétricas colocadas a elevaciones conocidas.

La siguiente ilustración muestra las condiciones previas y actuales de la obra de toma, que ha servido para el monitoreo de la corriente de forma permanente, tres veces por día: a las 7:00 am, al mediodía y a las 5:00 pm.

Ilustración 13. Proceso de restauración del sitio de presa. De izquierda a derecha: condición previa, restauración y estado de la obra de toma en la actualidad.

[26] *Los trabajos de restauración de la obra de toma iniciaron en el mes de mayo de 2023, concluyendo en septiembre de 2023. Adicional a ello, se construyó una cerca para proteger la Estación Hidrometeorológica La Escuela.*

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

Posterior a la restauración de la obra de toma, se colocaron escalas limnimétricas que facilitaran la medición de niveles de la superficie del agua en la misma. La forma típica de las escalas limnimétricas, así como el medio de verificación de su ubicación en el sitio, se muestra a través de la siguiente ilustración:

Ilustración 14. Ubicación de las escalas limnimétricas (izq) y diferentes representaciones de estas (der).

Los registros de observación han sido tabulados desde que se iniciaron las observaciones, el 4 de octubre de 2023 hasta la fecha, tres veces al día. Estas observaciones en un inicio tuvieron su contraparte digital a través de un *Data Logger* automático, con observaciones cada 10 minutos, destinado para complementar la observación directa, sin embargo, este sufrió un siniestro y fue sustraído al cabo de un par de meses de observación, llevándose consigo la vital información de niveles automáticos registrados.

El vandalismo en las estaciones de medición de forma automatizada no es una situación particular de este proyecto, siendo muy frecuente que, por razones de desconocimiento, ignorancia y a veces falta de socialización y presencia en los sitios de observación afecta la permanencia de este tipo de registros, debiéndose establecer mecanismos cada vez más ingeniosos para asegurar el resguardo del equipo.

Ilustración 15. Data Loggers instalados para el monitoreo de variables hidrometeorológicas y escalas limnimétricas.

BORRADOR

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

Las observaciones directas realizadas mediante lectura de escalas se proporcionan a través del siguiente gráfico:

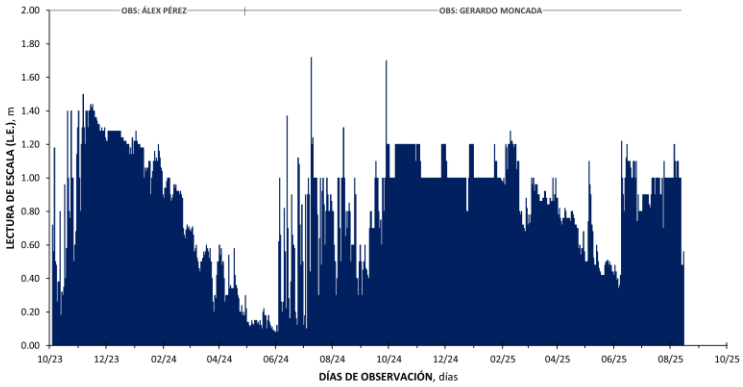


Gráfico 19. Registros limnimétricos en la AHS-001 del tributario de Río Namale, con sus respectivos observadores. Serie histórica 10.2023-08.2025.

Posteriormente, estos niveles limnimétricos fueron trasladados a caudales medios diarios a través de la determinación de los caudales de salida de la obra de toma: a través del tubo que conecta al desarenador y los flujos sobre el vertedor compuesto.

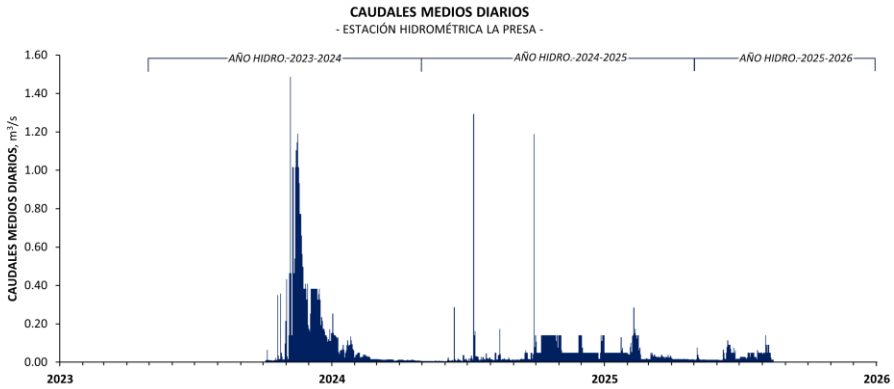


Gráfico 20. Caudales medios diarios en la AHS-001 del tributario de Río Namale. Serie histórica 10.2023-08.2025.

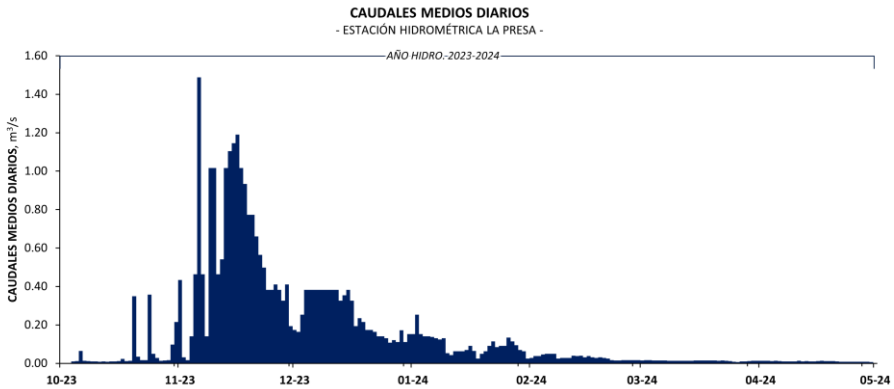


Gráfico 21. Caudales medios diarios en la AHS-001 del tributario de Río Namale. Serie histórica 10.2023-04.2024.

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

6. ANÁLISIS HIDROLÓGICO

La metodología aplicada en este estudio integra las capacidades de las herramientas informáticas modernas para ofrecer un análisis simplificado y preciso del comportamiento hidrológico de las cuencas estudiadas.

La estimación de régimen de una corriente fluvial, con propósitos de abastecimiento, inició con una evaluación preliminar de las condiciones que incurren en la regulación de los aportes pluviales de la subcuenca hasta el control de la corriente principal, sirviendo este de colector de toda la escorrentía generada.

Desde el punto de vista hidrológico, para la estimación del régimen fluvial se recurrió a una simulación sintética mediante la valoración de la escorrentía directa a través del procedimiento del ***Soil Moisture Accounting (SMA)***; se utilizó el software de modelización hidrológica **HEC-HMS[27] v4.13**, del *United States Army Corp of Engineers* (USACE) para estos propósitos.

La estimación de la escorrentía mediante el método del SMA requirió de la determinación de las capacidades de infiltración del suelo mediante la clasificación hidrológica de los mismos, así como la evaluación de cobertura forestal de los mismos.

Finalmente, el análisis del reservorio permitió estimar un caudal de aprovechamiento a través de la determinación de sus curvas de elevación, área y capacidad. Esto facilitó la labor de cuantificar la dotación aprovechable durante el estiaje.

6.1 Modelos digitales de elevación

En sus inicios, las aproximaciones para estimar el área de drenaje de una corriente en particular eran obtenidas de la cartografía oficial, contenidas en las Hojas Cartográficas[28] del Instituto Geográfico Nacional de Honduras (IGN). Sin embargo, los avances en la obtención de información espacial mediante sensores remotos han permitido la obtención de modelos numéricos de terreno que admiten mayor detalle que los procedimientos convencionales, facilitando las actividades para el desarrollo del análisis morfométrico.

Como plataforma para la estimación de la divisoria de aguas, y las características físicas del área de aportación, a través de herramientas de GIS[29], se recurrió a tres modelos digitales de elevación: el **SRTM GDEM**[30], desarrollado por la *NASA* y en colaboración con el *NGA*[31], con una resolución de píxel de 38.2 m; el modelo digital *Forest and Buildings removed Copernicus DEM* (**FABDEM**[32]) que elimina los sesgos de altura de edificios y árboles del modelo de elevación digital Copernicus (Airbus Defense

[27] *Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System.*
[28] *Las Hojas Cartográficas utilizadas en este documento corresponden a los códigos 1628 y 1636c.*
[29] *Geographical Information System o Sistemas de Información Geográfica.*
[30] *Shuttle Radar Topography Mission, Global Digital Elevation Model.*
[31] *U.S. National Geospatial-Intelligence Agency.*
[32] *Los autores utilizan el aprendizaje automático para eliminar edificios y bosques del modelo de elevación digital de Copernicus para producir, por primera vez, un mapa global de elevación con edificios y bosques eliminados, con un espaciado de cuadrícula de 1 segundo de arco (~30 m). https://data.bris.ac.uk/data/dataset/s5hqmjcdj8yo2ibzi9b4ew3sn*

BORRADOR

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

and Space GmbH, 2022), desarrollado por Jeffrey Neal y Laurence Hawker, entre otros, en la Universidad de Bristol (Hawker, y otros, 2022); y el modelo digital de terreno derivado de un levantamiento LiDAR[33] realizado en sitio de presa, con una resolución 0.5 m por píxel.

Modelo digital de elevaciones FABDEM

En el caso del FABDEM, los datos están disponibles con un espaciado de cuadrícula de 1 segundo de arco (aproximadamente 30 m en el ecuador) para el mundo. La siguiente ilustración permite mostrar las diferencias entre el modelo SRTM GDEM y el FABDEM con resoluciones equivalentes:

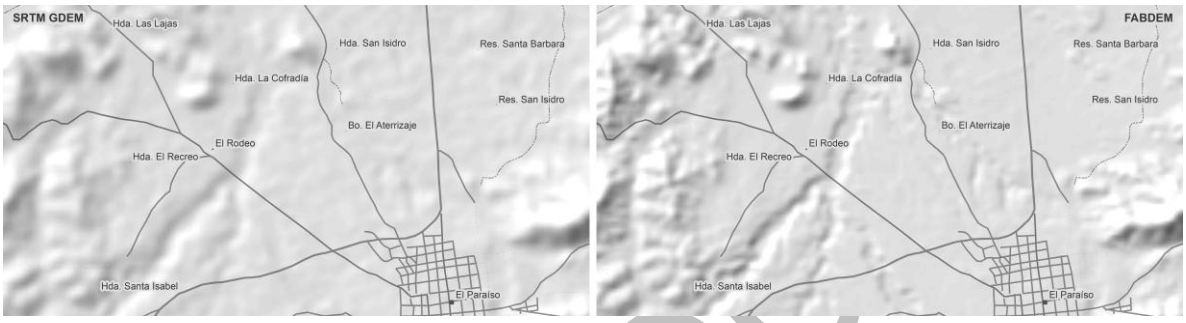


Ilustración 16. Comparación entre dos modelos digitales de elevación: SRTM GDEM (izquierda) y el FABDEM (derecha). Nótese la mejor representación de los cauces en el modelo FABDEM.

Un análisis de estos modelos numéricos de terreno, mediante sistemas de información geográfica, permite la estimación de los patrones de drenaje de cada unidad hidrológica, así como la derivación de parámetros relevantes para la caracterización hidrológica de la potencial respuesta unitaria de las subcuencas, culminando en la estimación de los aportes fluviales mediante modelización hidrológica.

Levantamiento topográfico con LiDAR

A finales de enero de 2025, se coordinó el desarrollo de un levantamiento topográfico mediante LiDAR con la finalidad de obtener definir, hidrológicamente, un potencial eje de la presa y la geometría del potencial reservorio, facilitando la estimación de los volúmenes que fueron analizados con la oferta que la corriente ofrece.

Esta actividad, se desarrolló el día 22 de enero, con un total de 61,934,026 puntos con un peso de 3.3 GB para tres tipos de archivos:

- *Nube de puntos cruda*: puntos con información tridimensional, intensidad y número del retorno, clasificación, entre otros (.las).

- *DEM*: modelo digital de elevaciones (.tif).

- *Ortofoto*: imagen aérea corregida geométricamente con georreferencia cartográfica.

[33] *Ligth Detection and Ranging, es un sistema de generación de nubes de puntos de relieve mediante tecnología láser midiendo el tiempo de retraso entre la emisión de pulsos y la detección de la señal reflejada. Los resultados generalmente andan en el orden de decenas de miles de puntos.*

BORRADOR

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

Ilustración 17. Actividad de campo correspondiente al levantamiento topográfico.

El modelo digital de elevaciones del levantamiento LiDAR con una resolución de 0.25 m^2 por píxel, con su respectiva ortofoto a una resolución de $3.24x10^{-4}$ m^2 por píxel, como resultado del procesamiento en gabinete de la información recopilada en campo, se presenta a través de la siguiente ilustración:

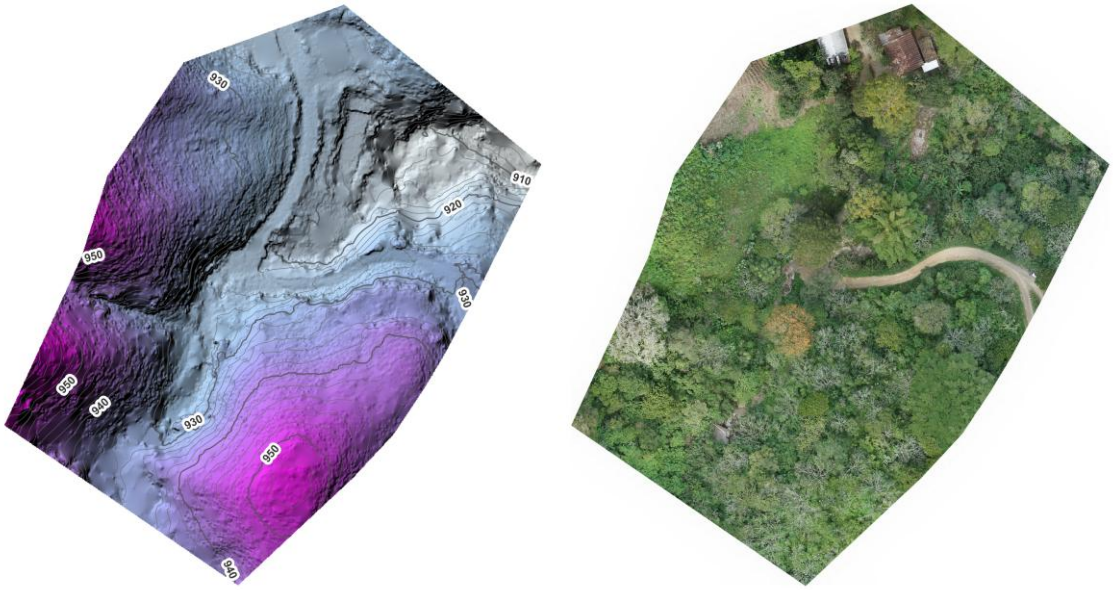


Ilustración 18. Modelo digital de elevaciones mediante LiDAR en el sitio potencial del reservorio (izq.) con su respectiva ortofoto (der.)

Los siguientes apartados de este capítulo se concentran en detallar las características de la superficie de aportación, así como la estimación del tiempo de concentración, entre otros parámetros, apoyados en los modelos digitales de terreno expuestos anteriormente.

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

6.2 Delimitación de la superficie de aportación

Desde el punto de vista hidrológico la cuenca podría definirse como el área de drenaje que concentra las aguas en un punto de interés conocido como control. Debido a que la información del subsuelo en nuestro país no está con el nivel de precisión de los modelos numéricos de terreno, la determinación de la cuenca se realiza considerando únicamente el aspecto morfométrico, por lo que las aproximaciones realizadas corresponden a delimitaciones estrictamente hidrográficas.

En términos generales, podemos detallar que el tributario de análisis posee un área de drenaje de 3.2 kilómetros cuadrados y un recorrido que puede catalogarse como de montaña, o con características de torrente[34] en el comportamiento de sus avenidas, según la literatura (Chow, Applied Hydrology, 1988).

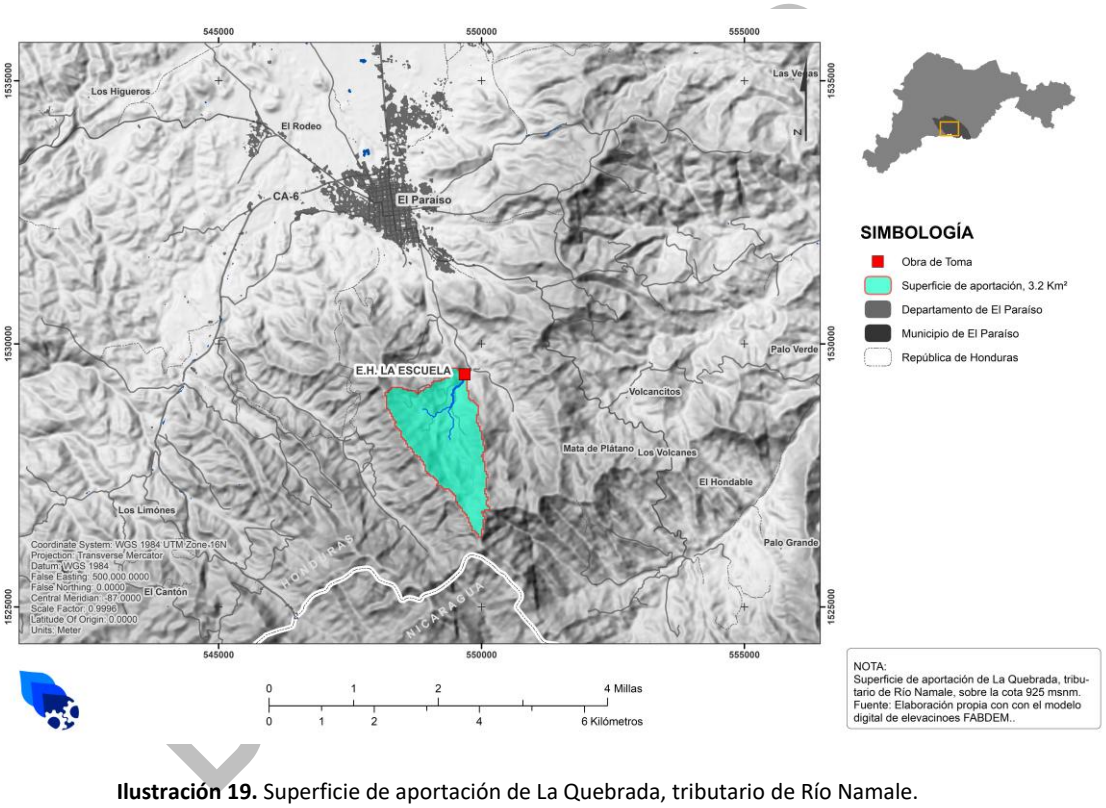


Ilustración 19. Superficie de aportación de La Quebrada, tributario de Río Namale.

6.3 Características morfométricas de la superficie de aportación

Los aguaceros con potencial de producir escorrentía directa eventualmente culminan en avenidas, siendo éstas la huella dactilar de las cuencas, como respuesta ante estos eventos atmosféricos, y vinculada directamente a las características morfométricas de la superficie de aportación, el proceso de transformación de la lámina de lluvia en lluvia efectiva y el tiempo de concentración, por mencionar algunos factores.

[34] *Los torrentes son corrientes fluviales naturales localizadas en zonas montañosas, donde los escarpes son pronunciados lo que facilita los procesos erosivos de pérdida de suelo.*

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

Las corrientes de montaña se caracterizan por su dificultad por sostener caudales del flujo base, sin embargo, estos se incrementan súbitamente ante tormentas de corta duración y gran intensidad, como consecuencia de las fuertes pendientes y cortos tiempos de concentración que caracterizan las estribaciones montañosas de nuestro país, en donde la capacidad erosiva de los flujos es alta.

En general, los parámetros físicos de una cuenca apoyan la deducción del comportamiento del hidrograma de avenida para un evento en particular. Asimismo, conocer las pendientes y perfiles de las corrientes analizadas permiten la valoración del potencial de desarrollo de las crecidas (Chow, Handbook of Applied Hydrology, 1964).

En nuestra zona de interés, se ha considerado necesario el realizar una valoración del desarrollo del hidrograma de respuesta de forma detallada, asociada a factores de forma y distribución de la red de drenaje.

Los aportes de las corrientes principales discurren desde el parteaguas de la Sierra de Dipilto, con elevaciones que oscilan entre los 1300 y 1400 m s.n.m. La cuenca de interés se muestra ligeramente alargadas, confirmado a través de los tres criterios de forma analizados: índice de compacidad[35] (I_C), factor de circularidad[36] (R_C) y razón de elongación[37] (R_e), detallados a través de la siguiente tabla:

Tabla 12. Factores de forma del tributario principal en la zona de interés.

Corriente	Longitud, km	Área, km^2	Perímetro, km	Pendiente, m/m	I_C	R_C	R_e
La Quebrada	3.8	3.2	8.7	0.170	1.38	0.53	0.09

**El análisis morfométrico se elaboró recurriendo a herramientas GIS apoyadas en el modelo digital de terreno antes mencionado.*

Un breve análisis de los resultados permite identificar la característica alargada de las superficies de aportación más relevantes, que se manifiesta a través del índice de compacidad, confirmado mediante el factor de circularidad, superior a la unidad; la razón de elongación por debajo de la unidad, permite el inferir que, en general, las subcuencas cuanto más alargada son, más retardo existe entre el momento de precipitación y el momento de crecida en la desembocadura, pero al mismo tiempo, la crecida es menos acusada y súbita, y por tanto, una reducción en el pico del hidrograma es prevista en contraste con subcuencas de próximas a ser redondas (Sala & Gay, 1981).

La siguiente ilustración detalla la delimitación de la superficie de aportación objeto de interés, con un área de drenaje estimada en 3.2 km^2, para un recorrido de 3.8 kilómetros sobre una pendiente promedio de 0.170 m/m. El disponer de estos modelos digitales de terreno ha permitido definir con mejor representación la corriente principal de la cuenca, así como el drenaje contiguo, como puede apreciarse a continuación:

[35] *Índice de compacidad de Gravelius* (Gravelius, 1914) – *relaciona el área de la cuenca con un círculo de igual área; valores cercanos a la unidad representan una cuenca circular o redonda.*
[36] *Factor de circularidad de Miller* (Miller, 1953) – *relaciona el área de la cuenca y el área de un círculo de igual perímetro; valores cercanos a la unidad corresponderían a una cuenca de tipo circular o redonda.*
[37] *Razón de elongación de Schumm* (Schumm, 1956) – *relaciona el diámetro de un círculo con igual área a la cuenca y la longitud mayor de esta; valores menores a la unidad representan cuencas alargadas. Cuanto menor sea este valor, más alargada es la forma de la cuenca.*

BORRADOR

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

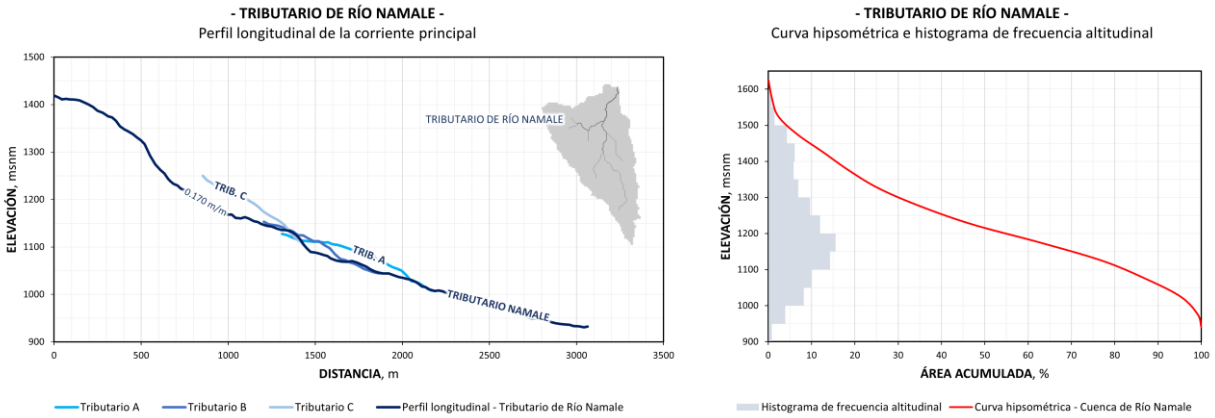


Gráfico 22. Perfil longitudinal (izq.) y curva hipsométrica relativa (der.) de La Quebrada.

Una breve revisión del histograma de frecuencia altitudinal nos permite apreciar que entre las cotas 1000 y 1300 m s.n.m. se concentra aproximadamente el 70% del área de la cuenca, lo que nos permite deducir que, si se realizan procesos de mejora en las prácticas agrícolas y se restaura la cuenca en esta franja altitudinal, su efecto se manifestaría en casi tres cuartas partes de los volúmenes del hidrograma.

Como resultado de la valoración de las principales características morfométricas, podemos inferir que también la cuenca de La Quebrada, sobre la cota 925 m s.n.m., presenta un factor de forma asociado a cuencas alargadas, donde podemos esperar que el desarrollo de las crecidas presente volúmenes mejor distribuidos durante la duración del evento, reduciendo el potencial ascenso que podríamos observar en una cuenca con un factor de forma más circular, siempre para la misma superficie de drenaje.

6.4 Series de suelos

La estimación de caudales de avenida, apoyados en registros climatológicos, requieren del conocimiento de las características de abstracción de la lámina de lluvia a través de la infiltración según la textura del suelo, así como la oposición que la vegetación ofrece al retrasar el viaje de la gota de lluvia para proveer al suelo del tiempo necesario para retenerla de forma temporal, y posteriormente cederla en forma de flujo base.

Se ha utilizado información del mapeo de suelos realizado en 1969 por la FAO, actualizado en 2002 en el Manual de Referencias Hidrológicas (Salinas Núñez, Sánchez, Zúniga Andrade, & Funez, 2002), identificando y reconociendo varios de los suelos caracterizados en el país, encontrándose en la totalidad de las cuencas que drenan los Suelos Chinampa (100%). El detalle de su distribución espacial se proporciona en la siguiente ilustración:

BORRADOR

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

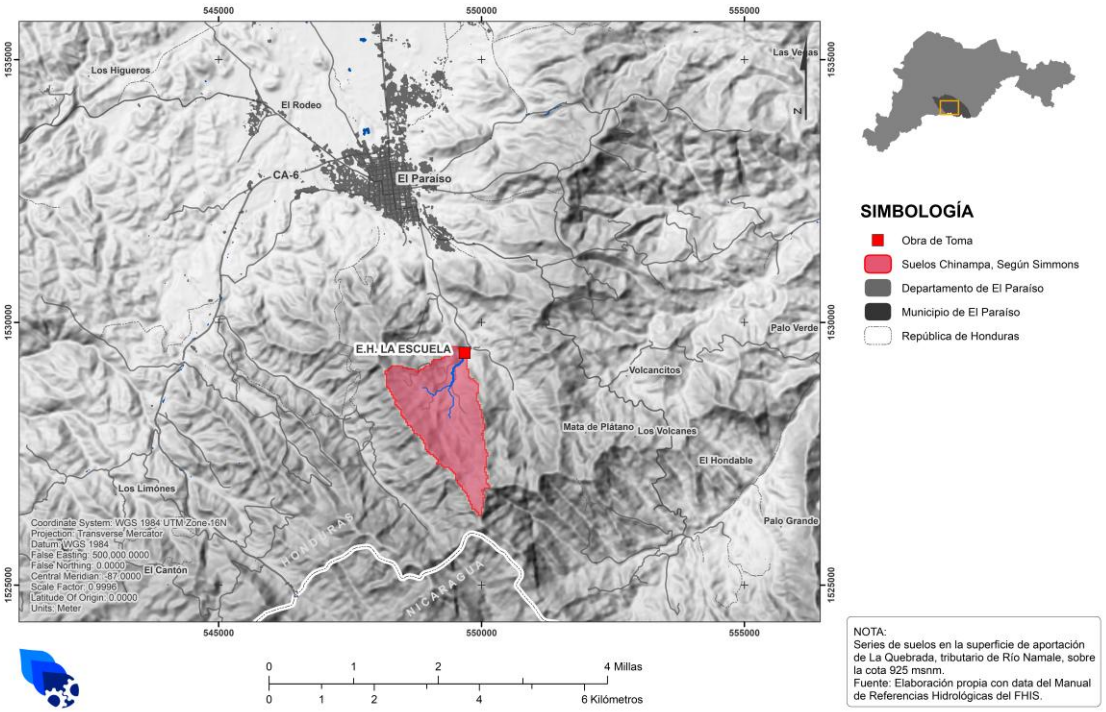


Ilustración 20. Series de suelos en la superficie de aportación de La Quebrada, tributario de Río Namale.

La descripción tipológica[38] de las series de suelos se detalla a continuación:

6.4.1 Suelos Chinampa (Chn)

Son suelos profundos, moderadamente bien drenados, de texturas finas principalmente, moderadamente erosionados, con relieve fuertemente escarpados a montañoso, con pendientes del 32% en el sitio de muestreo, aunque existen laderas con pendientes mayores, sin piedras, ni afloramientos desarrollados de materiales metamórficos principalmente esquistos cericíticos fuertemente meteorizados. Estos suelos están ocupados principalmente con cultivos de café y matorrales.

Por su pendiente principalmente, estos suelos presentan clase de capacidad de uso clase VII. Taxonómicamente por su profundidad y altitud, pueden considerarse como *Typic Tropustults* (FHIS; INTEMA, 2002, pág. 251).

Según Simmons, suelen ser suelos bien avenados, profundos, formados sobre gneis o esquisto de grano grueso, ocupan un relieve colinoso o escarpado con pendientes que oscilan frecuentemente entre 20 y 40%. Están asociados con suelos Danlí y Jacaleapa, pero se distinguen de los primeros por la naturaleza del material de partida y de los segundos por la profundidad de la capa del suelo.

BORRAL

[38] *Fuente: Manual de Referencias Hidrológicas, FHIS 2002.*

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

Se encuentran en el departamento de Choluteca, al este y nordeste de la ciudad de Choluteca y en El Paraíso, al sudeste de la ciudad de El Paraíso.

El suelo superficial posee una profundidad de hasta unos 25 cm, es franco-arenoso muy fino a franco arcilloso-arenoso fino, friable, pardo oscuro. La reacción es mediana a ligeramente ácida, pH 6.0 aproximadamente. El subsuelo posee una profundidad de hasta unos 75 cm, siendo franco-arcillo-arenoso, pardo amarillento a pardo rojizo, friable.

La vegetación natural en los suelos Chinampa es el pinar con algunos ejemplares de roble y liquidámbar. En este suelo se cultiva extensivamente el café, en la vecindad de El Paraíso y cerca de El Corpus, pero gran parte del área es forestal y puede usarse para pastos naturales, se cultiva extensivamente maíz, frijoles y otros productos de subsistencia mediante un sistema de cultivo migratorio.

En algunas partes hay grandes piedras y las rocas afloran a la superficie, pero ello no es muy frecuente. Se recomienda que se intensifique la producción de café en estos suelos.

Los suelos Chinampa participan de las clases IV y VII de capacidad agrológica. Los Suelos Chinampa en esta zona fueron clasificados hidrológicamente como suelos tipo *B*.

6.5 Clasificación hidrológica de los suelos

El conocer las capacidades de cada serie de suelo para admitir la infiltración es un aspecto primordial en el proceso de estimar la fracción de lluvia efectiva que finalmente escurre, interacción que se complementa con la intercepción de la gota de lluvia por la vegetación, y su respectivo retraso en su contacto con la superficie del suelo.

Los suelos clasificados como *Grupo A* poseen tasas de infiltración[39] consideradas como muy altas ($> 7.6\ mm/h$), con muy bajo potencial de escorrentía. Los suelos dentro del *Grupo B*, poseen tasas de infiltración consideradas como moderadas a altas $(3.8 - 7.6\ mm/h)$s. Los suelos dentro del *Grupo C* poseen tasas de infiltración consideradas como bajas$(1.3 - 3.8\ mm/h)$ incluso en estado saturado.

Por su parte, los suelos del *Grupo D* tienen un alto potencial de escorrentía ya que sus tasas de infiltración son de muy bajas a nulas $(0.0 - 1.3\ mm/h)$ (Natural Resources Conservation Service, 1986). La distribución espacial de esta clasificación se detalla la siguiente ilustración:

[39] *Según los valores expuestos en el Technical Release No. 55 del Natural Resources Conservation Service, Apéndice A.*

BORRADOR

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

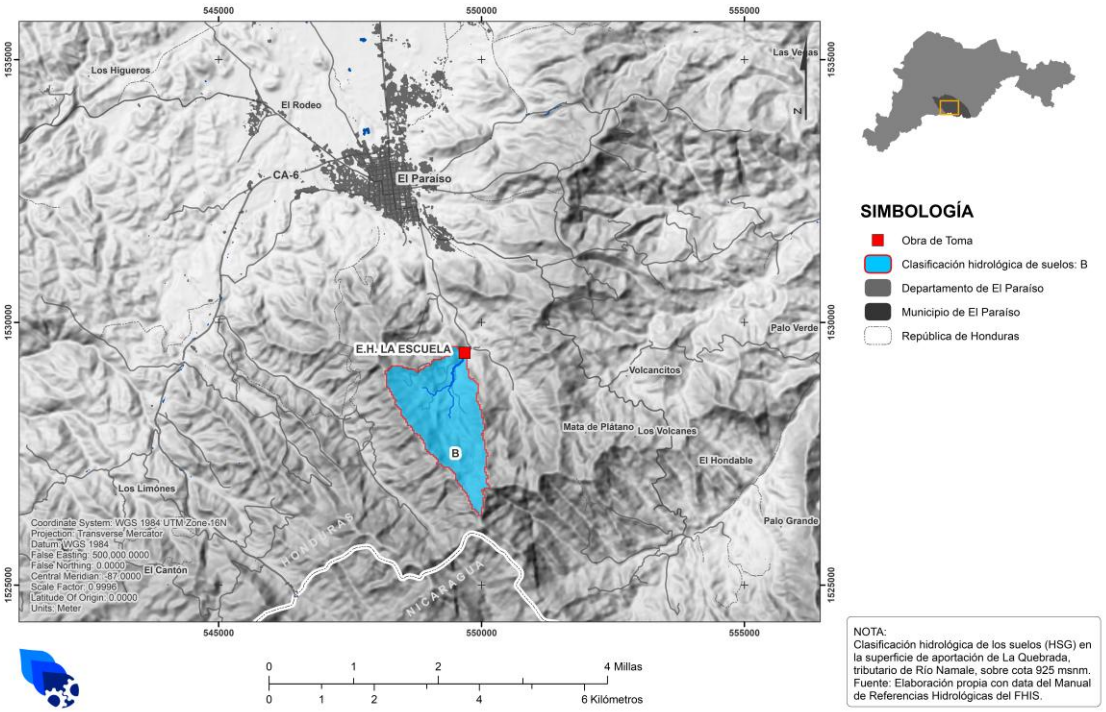


Ilustración 21. Series de suelos en la superficie de aportación de La Quebrada, tributario de Río Namale.

BORRAL

6.6 Usos y cobertura forestal de los suelos

La estimación de caudales de avenida, apoyados en registros climatológicos, requieren del conocimiento de las características de abstracción de la lámina de lluvia a través de la infiltración según la textura del suelo, así como la oposición que la vegetación ofrece al retrasar el viaje de la gota de lluvia para proveer al suelo del tiempo necesario para retenerla de forma temporal, y posteriormente cederla en forma de flujo base.

Las actividades antrópicas orientadas al uso de los suelos para obtener un beneficio, o prestar un servicio, se encuentran presentes en la superficie de aportación. La cuenca, hasta su punto de desagüe, se encuentra moderadamente intervenida por actividades humanas, por lo que la capacidad de absorción del suelo se encuentra influenciada por estas condiciones, donde el manto vegetativo es el primer obstáculo tangible que la gota de lluvia enfrenta, previo al contacto con la capa superficial del suelo.

Una iniciativa del *Instituto de Conservación Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre (ICF)* a través del *Anuario Estadístico Forestal*, en su edición de 2024, dio origen a una actualización de la capa de uso actual y cobertura forestal de los suelos en Honduras, detallados a continuación: a través de la siguiente ilustración:

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

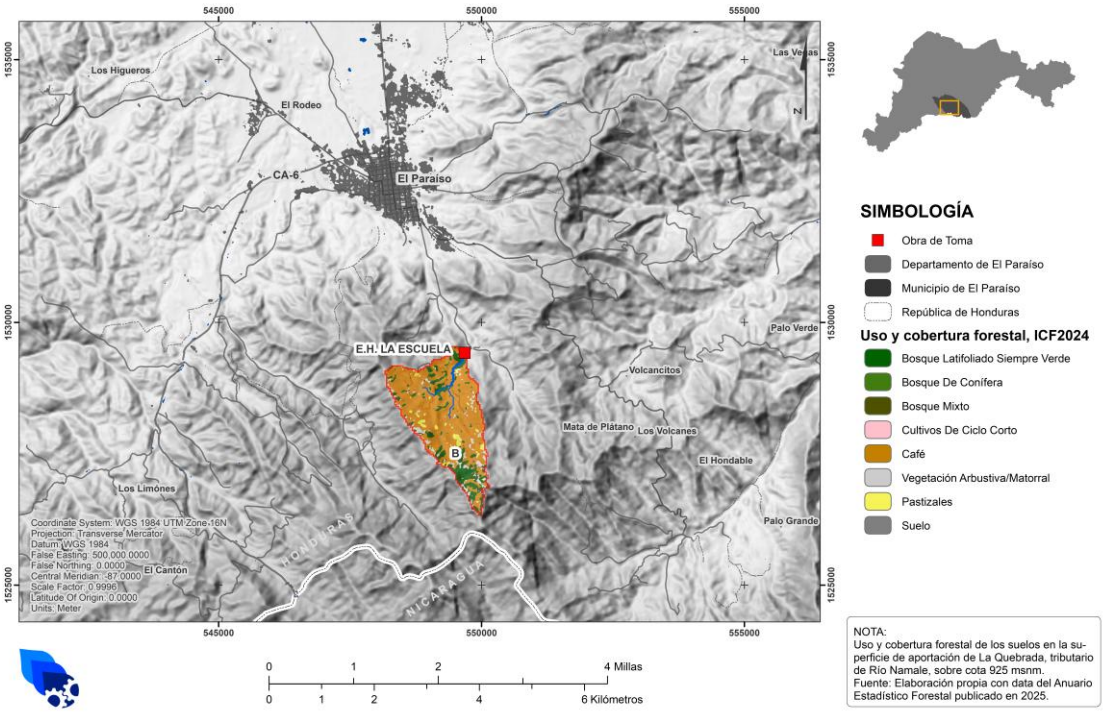


Ilustración 22. Uso y cobertura forestal de los suelos en la superficie de aportación de La Quebrada.

Las unidades de uso y cobertura forestal identificadas en la subcuenca se describen a continuación:

6.6.1 Bosque

Bosque latifoliado húmedo: Comunidades de árboles propios de los climas tropicales; estos bosques se caracterizan por la presencia de especies de hoja ancha siempre verdes, con alta densidad de especies.

Bosque latifoliado deciduo: se manifiesta por asociaciones de árboles de hoja ancha en los que sus ejemplares pierden las hojas de manera parcial o total en la época seca de cada año. Este fenómeno también se le conoce como estrés hídrico.

Bosque mixto: es una asociación entre especies del bosque latifoliado y bosque de conífera, identificables en zonas de transición entre ambos bosques. En este tipo pueden predominar las coníferas o especies de hoja ancha dependiendo de factores edáficos, clima, exposición al sol, etc.

Las especies más predominante son *Pinus oocarpa* o *Pinus maximinoi* con varias especies del género *Quercus*, *Liquidámbar* stiraciflua y *Carpinus carolinensis,* entre otros.

Bosque de conífera denso: este tipo de bosque está compuesto por 7 especies del género *Pinus*. Los más frecuentes son el *Pinus oocarpa*, *Pinus maximinoii* y *Pinus caribaea*. Se puede encontrar en zonas con una precipitación promedio menor a los 2,500 mm por año con una

BORRAL

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

estación seca desde febrero a mayo. En Honduras se encuentra entre el rango altitudinal de 0 - 2,849 msnm.

Bosque de conífera ralo: este tipo de bosque está compuesto por las mismas especies del pino denso, pero con menor densidad que el bosque de conífera denso (número de individuos por área). Los principales factores que lo vuelven menos denso son: características edáficas, pendiente, clima y aprovechamiento selectivo. Los porcentajes de cobertura pueden estar entre 15 a 50 % de cobertura arbórea.

6.6.2 Agroforestal

Cafetales: se manifiestan en plantaciones de diferentes especies de café ya sea tecnificado, semitecnificado o tradicional, el cual, puede o no estar cubierto por especies que funcionan como sombra; ingas, musáceas y algunas maderables.

6.6.3 Agropecuario

Agricultura tecnificada: Áreas destinadas al cultivo de hortalizas, frutas, granos básicos y otros mediante la implementación de prácticas mecanizadas de preparación, siembra, riego y control en zonas relativamente planas del país.

Pastos/Cultivos: son áreas utilizadas para prácticas agrícolas y pecuarias tradicionales en Honduras, frecuentemente entremezcladas con áreas de vegetación secundaria y caseríos.

6.6.4 Cuerpos de agua

Cuerpos de agua artificial: son todos aquellos cuerpos de agua creados por el hombre, tales como represas o estanques, piscinas, lagunas de oxidación entre otros; en Honduras el cuerpo artificial de agua más grande es la represa hidroeléctrica Francisco Morazán (El Cajón). En este estudio, estaría constituido por la Represa Los Laureles.

Ríos y otras superficies de agua: Son todos los cuerpos de agua, tales como ríos, mares u océanos que cubren parte de la tierra de forma natural.

6.6.5 Otros usos

Árboles dispersos fuera de Bosque: son los árboles que están fuera de superficies boscosas mayores a 0.5 ha y se encuentran distribuidos de forma aislada o parcialmente agrupada en lotes entre 0.1 y 0.5 ha.

Vegetación secundaria húmeda: comprende aquella cobertura vegetal originada luego de la intervención o por la destrucción de los bosques húmedos, conocida también como sucesión vegetal.

BORRADOR

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

Vegetación secundaria decidua: esta cobertura se presenta en aquellas zonas donde el bosque latifoliado deciduo ha sido removido por actividades como agricultura y ganadería, que luego de ser abandonadas originan una vegetación secundaria con alturas promedio inferiores a 5 m.

Zona urbana continua: son espacios conformados por edificaciones y los espacios adyacentes a la infraestructura edificada. La vegetación representa una baja proporción del área del tejido urbano.

Zona urbana discontinua: son espacios conformados por edificaciones y zonas verdes. Las edificaciones, vías e infraestructura cubren la superficie del terreno de manera dispersa y discontinua, ya que el resto del área está cubierta por vegetación. Esta unidad puede presentar dificultad para su delimitación cuando otras coberturas de tipo natural y seminatural se mezclan con áreas clasificadas como zonas urbanas.

Suelo desnudo continental: son todas aquellas superficies de suelo desprovistas de vegetación, ya sea por causas naturales o antropogénicas constituidos especialmente por arenas y sedimentos de las riberas de los ríos, deslizamientos de tierra, aluviones, minas a cielo abierto, calles con o sin revestimiento, balastreras, áreas erosionadas, entre otros.

Finalmente, se resumen los usos y coberturas forestales en el área de drenaje a través de la siguiente tabla:

Tabla 13. Resumen de los usos y coberturas forestales de los suelos en la superficie de drenaje de interés.

USO & COBERTURA FORESTAL	LA QUEBRADA		
	km²	Ha	%
Bosque latifoliado siempre verde	0.492	4922	15
Bosque de conífera	0.000	1	0
Bosque mixto	0.091	909	3
Cultivos de ciclo corto	0.001	8	0
Café	2.278	22775	72
Vegetación arbustiva/matorral	0.199	1989	6
Pastizales	0.112	1117	4
Suelo	0.004	42	0
Total	**3.176**	**31763**	**100**

Las superficies consideradas en esta tabla responden únicamente a la cuenca sobre la cota 925 m s.n.m.

6.7 Estimación del número de curva

Durante una tormenta, una fracción del espesor total de la lámina de lluvia se convierte en escorrentía directa, y otra se infiltra para transformarse en escorrentía subsuperficial[40]. La textura del suelo,

[40] *De forma más detallada, del espesor total de precipitación de un evento, la primera abstracción corresponde a la evapotranspiración, posteriormente seguido de la infiltración, donde la escorrentía que ingresa al suelo permite humedecerlo y el exceso de esta humedad se traslada a la escorrentía subsuperficial y el sustento de los acuíferos, siendo estos últimos los que alimentan el flujo base.*

BORRADOR

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

conforme a su distribución granulométrica en sus diferentes horizontes, representa la oposición ulterior para que el flujo en el medio poroso finalmente se incorpore en forma de caudal base.

Las características con las que el suelo absorbe, y temporalmente retiene, la fracción de lámina de lluvia, en condiciones de prolongada saturación, brinda los insumos necesarios para definir un estimador del potencial de escurrimiento de la superficie de aportación, conocido como número de curva (CN). La estimación del CN se realiza utilizando los esquemas propuestos por el *Natural Resources Conservation Service* (NRCS, 1999), otrora SCS, y en el caso de las subcuencas analizadas, se resumen través de la siguiente tabla:

Tabla 14. Resumen del número de curva en la subcuenca de interés.

Cuenca	Área, km^2	CN, ARC I	CN, ARC II	CN, ARC III
La Quebrada	3.2	45.5	**66.5**	82.0

**ARC – antecedent runoff condition o condición antecedente de escurrimiento. Los registros pluviométricos de Santa Rita y Tela confirman cierta frecuencia en las observaciones posteriores a 5 días continuos de lluvia, con un mínimo de 54 milímetros acumulados, permitiendo adoptar la ARC-III.*

La siguiente ilustración detalla la distribución espacial del número de curva sobre las superficies de aportación de ambas corrientes en análisis:

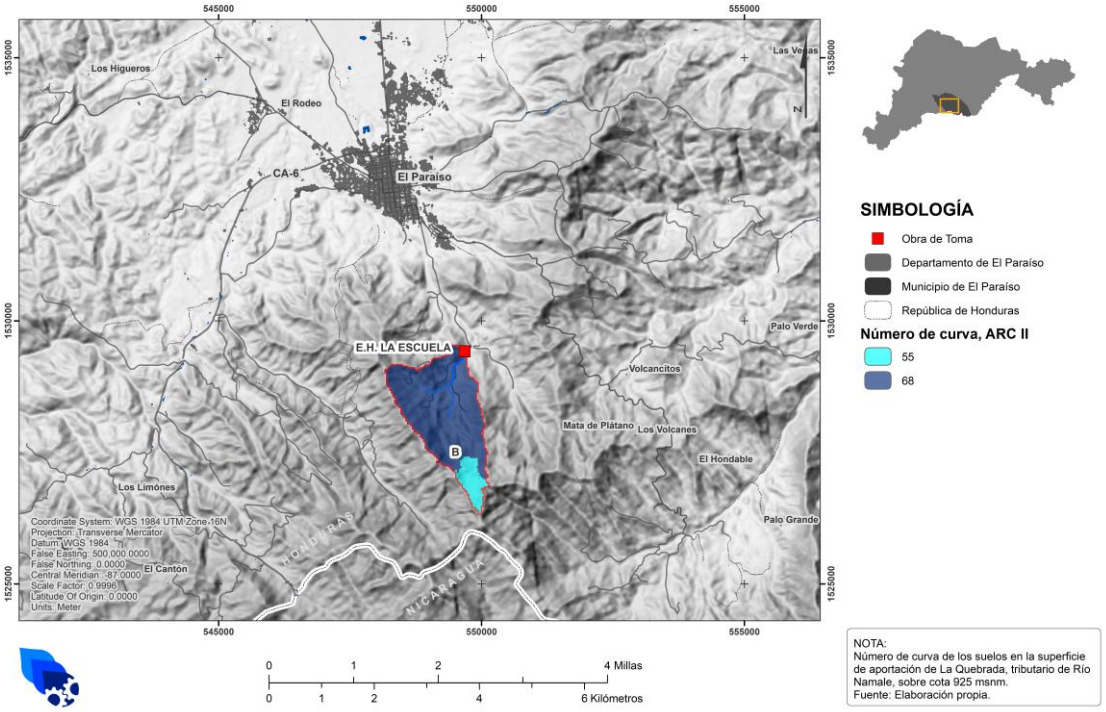


Ilustración 23. Uso y cobertura forestal de los suelos en la superficie de aportación de La Quebrada.

La estimación del CN, en la totalidad de las superficies de aportación, se realizó mediante un proceso de operación entre ráster, por su versatilidad, encontrando un CN ponderado de 66.5 para la subcuenca de La Quebrada, valor que podría considerarse moderado, al interpretarse como una

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

superficie de aportación con moderada capacidad de escurrimiento, atribuida a suelos con limitadas tasas de infiltración y procesos significativos de degradación de las subcuencas.

La condición antecedente de escurrimiento de tipo III representa el escenario que maximiza el potencial de lluvia efectiva que finalmente contribuye al incremento de la avenida, no obstante, no se dispone de registros suficientes[41] para apoyar su adopción, por lo que esta condición no ha sido considerada en los análisis. Se adoptó la condición antecedente de escurrimiento de tipo II: un escenario atípico durante la época lluviosa.

6.8 Estimación del tiempo de concentración

Para la estimación de los tiempos de concentración, la literatura sugiere diversas metodologías que en la actualidad continúan siendo tema de debate sobre la expresión idónea. Sin embargo, para este estudio, hemos considerado apropiadas las relaciones desarrolladas por Z. P. Kirpich (Kirpich, 1940), Giandotti (M., 1934), Témez (Témez, 2003) y Johnstone & Cross (Johnstone & Cross, 1949), entre otras, por tratarse de modestas áreas de drenaje, asociando pendientes ponderadas y la longitud de recorrido de cada corriente por unidad hidrológica.

La totalidad de los recorridos de ambas corrientes contempló la separación de los tiempos de concentración en diversos tramos, con gradientes energéticos similares y finalmente adicionando los resultados. A su vez, esta separación facilitó el calcular la pendiente media de la corriente principal a través de una ponderación de sus segmentos.

Los resultados de la estimación del tiempo de concentración hasta el control de cada corriente, según Kirpich, adicional a ello, se realizó una simulación hidráulica de la escorrentía superficial sobre la cuenca, con la intención de reconocer el patrón de respuesta de la unidad de respuesta hidrológica.

Tabla 15. Resumen de los tiempos de concentración de las principales unidades de respuesta hidrológica.

Método	Corriente	Longitud, km	T_C, min	T_{LAG}, min	Velocidad, m/s
Kirpich	La Quebrada	3.8	22	13	2.9
Temez	La Quebrada	3.8	70	42	0.9
HR 1mm	La Quebrada	3.8	100	60	0.6
HR 3mm	La Quebrada	3.8	60	36	1.1
HR 10mm	La Quebrada	3.8	35	21	1.8

** Los tiempos de concentración fueron estimados hasta el control de la unidad hidrológica, detallado anteriormente.*
*** HR: HEC-RAS, también utilizado para confirmar las valoraciones de los tiempos de respuesta de la unidad hidrológica.*

En lo concerniente a la estimación de los tiempos de concentración, mediante simulación hidráulica del comportamiento de la escorrentía, se consideraron tres escenarios de lluvia efectiva: 1 mm, 3 mm y 10 mm. Finalmente, se optó utilizar el más cercano al acumulado que manifiesta una tormenta recurrente, asociada a un período de retorno de 2 años, con una duración 40 minutos, que ha sido el valor final del tiempo de concentración adoptado. Sólo en el caso de la evaluación de una crecida

[41] *Para poder justificar la utilización del CN tipo III es necesario tener en los registros al menos un episodio donde se haya observado un acumulado de 54 milímetros de precipitación.*

BORRADOR

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

extrema, se recurrió a un tiempo de concentración de 25 minutos, considerando que las velocidades del escurrimiento incrementan en función del caudal generado.

El siguiente gráfico muestra la simulación de la escorrentía mediante el modelo bidimensional sobre el modelo numérico del terreno para el área de drenaje de La Quebrada, sobre la cota 925 m s.n.m.:

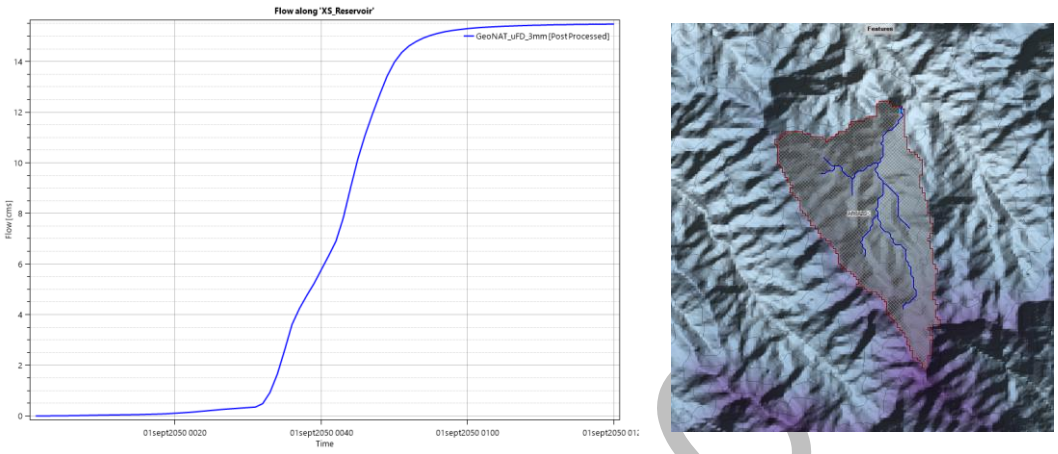


Gráfico 23. Simulación en condición bidimensional de un escenario de tormenta para conocer la respuesta de La Quebrada, mediante simulación hidráulica de la precipitación en HEC-RAS.

Una breve inspección del gráfico anterior nos permite concluir que, bajo una precipitación efectiva de aproximadamente 18 mm/h, como escenario de respuesta de la escorrentía de La Quebrada, se observaría un tiempo de concentración que podría ubicarse entre 40 a 50 minutos. Escenarios más atípicos reflejarían un tiempo de concentración mucho menor.

6.9 Estimación de aportes fluviales mediante el SMA

Un estimado del escurrimiento de las cuencas hidrográficas que subtiende el sitio de presa ha sido estimado mediante la aplicación del método *Soil Moisture Accounting (SMA)*, incorporado en el software de modelización hidrológica de eventos HEC-HMS.

Los siguientes apartados pretenden resumir los pormenores de la conceptualización, la modelización y los resultados de la aplicación del balance hídrico de la cuenca mediante SMA.

6.9.1 Conceptualización teórica

En general, los modelos hidrológicos comúnmente utilizados para obtener la lámina de escurrimiento a partir de una tormenta se conocen como modelos de eventos, es decir, estos simulan el comportamiento de un sistema hidrológico durante un evento pluvial determinado, y para ello, requieren de las especificaciones de las condiciones al inicio de ese evento en particular.

Como alternativa, se propuso el *Soil Moisture Accounting*, un modelo hidrológico continuo, que representa un modelo hidrológico que simula las condiciones climáticas húmedas y secas.

BORRADOR

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

Esta metodología pretende transformar los espesores de lluvia en escorrentía, a partir de las características propias de la cuenca bajo análisis, como ser: área, tiempo de concentración, tipo de suelos y cobertura vegetal (HEC, 2011, pág. 43).

Otras variables tipificadas que se destacan en este procedimiento son: las abstracciones iniciales, tanto por follaje o intercepción, así como por empozamiento del suelo; la conductividad hidráulica, de acuerdo a valores típicos de la literatura atendiendo las texturas del suelo; la capacidad de almacenamiento del suelo, que es función de la porosidad del mismo; la tasa de infiltración típica, según la capacidad hidrológica y, finalmente, la tasa de percolación en el subsuelo (Hydrologic Engineer Center, 2011, pág. 139).

En términos generales, el *Soil Moisture Accounting* se estructura en dos componentes: ***componente de almacenamiento*** y ***componente de flujo***, detallados a continuación:

6.9.1.1 Componente de almacenamiento

Almacenamiento del dosel arbóreo o intercepción: la intercepción del dosel arbóreo representa la precipitación que se captura en árboles, arbustos y pastos, y no alcanza la superficie del suelo. La precipitación es la única entrada a esta capa. Cuando ocurre la precipitación, primero llena el almacenamiento del dosel; sólo después de que se llena este almacenamiento, la precipitación está disponible para llenar otros volúmenes de almacenamiento. El agua en el almacenamiento de intercepción se mantiene hasta que se elimina por evaporación.

Almacenamiento por intercepción superficial: el almacenamiento de la depresión superficial es el volumen de agua contenida en depresiones superficiales poco profundas. Las entradas a este almacenamiento provienen de la precipitación no capturada por la intercepción del dosel arbóreo y los excesos que superan la tasa de infiltración. Las salidas de este almacenamiento pueden deberse a infiltración y evapotranspiración[42]. Cualquier contenido almacenado en la depresión de la superficie al comienzo del paso de tiempo está disponible para infiltración. Si el agua disponible para la infiltración excede la tasa de infiltración, se llena el almacenamiento de intercepción en la superficie. Una vez que se excede el volumen de intercepción en la superficie, este exceso de agua contribuye a la escorrentía superficial.

Almacenamiento del perfil del suelo: el almacenamiento del perfil del suelo representa el agua almacenada en la capa superior del suelo. El flujo de entrada es la infiltración desde la superficie. Las salidas incluyen la filtración a una capa de agua subterránea y evapotranspiración.

BORRADOR

[42] La evapotranspiración se compone de dos procesos que ocurren simultáneamente: la evaporación y la transpiración de las especies vegetales.

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

La zona del perfil del suelo se divide en dos regiones, la zona superior y la zona de tensión. La zona superior se define como la porción del perfil del suelo que perderá agua por evapotranspiración y, potencialmente, por percolación. La zona de tensión se define como el área que perderá agua únicamente por evapotranspiración. La zona superior representa el agua retenida en los poros del suelo. La zona de tensión representa el agua unida a las partículas del suelo. La evapotranspiración, en un inicio, ocurre desde la zona superior y, la zona de tensión al final.

Además, la evapotranspiración se reduce por debajo de la tasa potencial que se produce en la zona de tensión. Esto representa la resistencia natural creciente en la eliminación del agua unida a las partículas del suelo. La evapotranspiración también puede limitarse al volumen disponible en la zona superior durante los meses de invierno, lo que representa el final de la transpiración por las plantas.

Almacenamiento del agua subterránea: las capas de agua subterránea en el SMA representan procesos horizontales del interflujo, llegando a incluir una o dos capas. El agua se filtra en el almacenamiento de agua subterránea desde el perfil del suelo. La tasa de percolación es una función de la tasa de percolación máxima especificada por el usuario y el almacenamiento actual en las capas entre las cuales fluye el agua.

Las pérdidas de una capa de almacenamiento de agua subterránea, por su parte, se deben al flujo de agua subterránea o la filtración de una capa a otra, en donde la percolación del perfil del suelo entra en la primera capa. El agua almacenada puede filtrarse desde la primera capa a la capa de agua subterránea debajo, o desde esta última a la filtración profunda. En el último caso, esta agua se considera pérdida del sistema ya que el flujo del acuífero no está modelado en la SMA.

BORRADOR

6.9.1.2 Componente de flujo

Precipitación: representa una entrada al sistema de almacenamientos, primero contribuyendo al almacenamiento de la intercepción del dosel arbóreo. Si el almacenamiento del dosel se llena, la cantidad en exceso estará disponible para la infiltración.

Infiltración: constituida por el agua que entra al perfil del subsuelo desde el suelo superficial. El agua disponible para la infiltración durante un intervalo de tiempo proviene de la precipitación que pasa a través de la intercepción del dosel, más el agua que ya está almacenada en la superficie.

Percolation: es el movimiento del agua hacia abajo desde el perfil del subsuelo suelo, a través de las capas de agua subterránea, y al interior de un acuífero profundo. En el modelo SMA, la tasa de infiltración entre el almacenamiento del perfil del subsuelo y una capa de agua subterránea, o entre dos capas de agua subterránea, depende del

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

volumen en la fuente y las capas receptoras. La tasa es mayor cuando la capa fuente está casi llena y la capa receptora está casi vacía.

Escorrentía superficial y flujo de agua subterránea: la escorrentía superficial es el agua que excede la tasa de infiltración y desborda el almacenamiento superficial; este volumen de agua en exceso es la escorrentía directa.

El flujo de agua subterránea es la suma de los volúmenes de flujo de agua subterránea de cada capa de esta al final del intervalo de tiempo.

Evapotranspiración: es la pérdida de agua de la intercepción del dosel arbóreo, la depresión de la superficie y el almacenamiento del perfil del suelo. En el modelo HEC-HMS SMA, la demanda de evapotranspiración potencial puede calcularse a partir de los espesores mensuales de evaporación del tanque evaporímetro, multiplicados por los coeficientes de corrección del tanque, que varían mensualmente y se ajusta al intervalo de tiempo.

El volumen potencial de evapotranspiración se satisface primero con la intercepción del dosel arbóreo, luego con la intercepción de la superficie y finalmente con el perfil del suelo. Dentro del perfil del suelo, el potencial de evapotranspiración se realiza primero desde la zona superior, luego la zona de tensión. Si el ET potencial no se satisface completamente de un almacenamiento en un intervalo de tiempo, el volumen ET potencial insatisfecho se llena desde el siguiente almacenamiento disponible.

6.9.2 Parámetros adoptados

La concepción de parámetros como insumos para alimentar el modelo *Soil Moisture Accounting* fue posible gracias a la detallada referencia que brinda la literatura disponible[43]. La siguiente tabla presenta los métodos y variables empleadas en el cálculo del balance hídrico de las cuencas de interés mediante la implementación del SMA:

Tabla 16. Parámetros adoptados para la implementación del SMA en la microcuenca de La Quebrada.

Método	Variable	Input	Fuente/Observación
Generalidades	Área (km^2)	160.9	SRTM DEMv3
Canopy method		Simple canopy	
	Initial Storage (%)	2	Condición asumida en follaje
	Max Storage (mm)	4	Tabla 3, Manual de Referencias Hidrológica, abstracciones iniciales debido a humedad captada por el dosel arbóreo.
	Crop Coefficient	0.9	Aplica a la evapotranspiración potencial
	Uptake Method	Tension reduction	
Surface Method		Simple Surface	
	Initial Storage (%)	10	Condición de almacenamiento asumido en la superficie
	Max Storage (mm)	30	Almacenamiento del suelo en la superficie debida a depresiones antes de que inicie la escorrentía
Loss Method		SMA	

[43] *Una descripción completa de cada parámetro puede ser encontrado en el propio manual del usuario del programa HEC-HMS.*

BORRADOR

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

Método	Variable	Input	Fuente/Observación
	Soil (%)	5	Almacenamiento del suelo asumido al inicio de simulación
	Groundwater 1 (%)	40	Almacenamiento de agua subterránea al inicio de la simulación
	Max Infiltration (mm/h)	60	Manual de Referencias Hidrológicas, Anexo 2, Suelos Chinampa, según reportes de campo
	Impervious (%)	1	Área impermeable
	Soil Storage (mm)	18	Profundidad el suelo multiplicado por la porosidad. El Manual de Suelos de Simmons indica la profundidad típica para los diferentes tipos de suelo. Raws, et al., 1982 indica la porosidad de los mismos. El valor utilizado ha sido estimado como la ponderación de los valores correspondientes a los diferentes tipos de suelo que se encuentran en la cuenca.
	Tension Storage (mm)	18	Porcentaje de humedad no susceptible a percolación
	Soil Percolation (mm/h)	10	Rawl, et al., 1982, presenta la conductividad hidráulica saturada para los diferentes tipos de suelo, la cual corresponde a la velocidad de la movilización de la humedad en el suelo
	GW 1 Storage (mm)	10	Capacidad de almacenamiento de agua en el subsuelo
	GW 1 Percolation (mm/h)	100	Velocidad de percolación al suelo profundo; la salida del sistema
	GW 1 Coefficient (hr)	6	Tiempo de respuesta del agua subterránea a convertirse en flujo base
Transform Method		SCS Unit Hydrograph	
	Lag Time (m)	15	0.6 del tiempo de concentración.
Base Flow		Recession	
	Initial discharge (m^3/s)	0.154	Flujo base al inicio de la simulación.
	Recession constant	0.96	Constante de recesión de la microcuenca.
	Threshold	Ratio to peak	
	Ratio	0.51	Tiempo de respuesta del agua subterránea a convertirse en flujo base

En el caso de la constante de recesión, esta fue determinada a través del los hidrogramas de los caudales medios diarios, obtenida a través del análisis del siguiente gráfico:

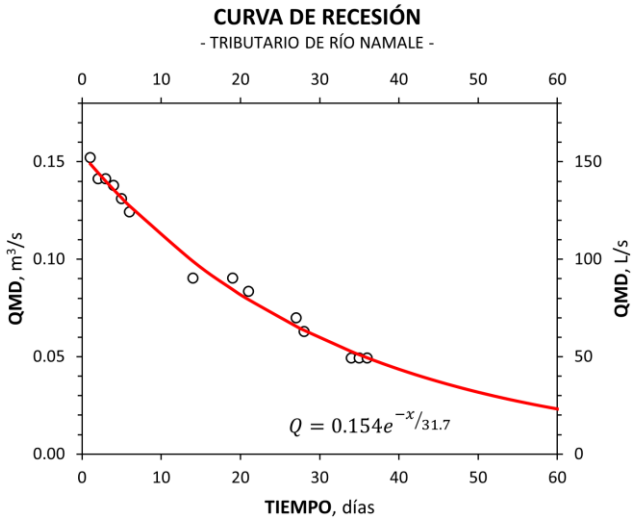


Gráfico 24. Curva de recesión de La Quebrada para el ciclo hidrológico 2023-24.

BORRADOR

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

6.9.3 Distribuidor temporal de las lluvias diarias

El dato de entrada relevante para la modelización hidrológica mediante el SMA, definiendo las condiciones climáticas húmedas y secas a lo largo de la modelización.

Los datos de lluvia disponibles para la Estación Hidrometeorológica La Escuela, a nivel diario[44], tuvieron que ser disgregados a nivel horario para tener una respuesta más significativa de los valores de escorrentía generados por la modelización.

Haciendo uso de los valores de lluvia de corta duración de esta misma estación, obtenidas de registros pluviográficos, representados por las Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia de la Estación Climatológica Villa Ahumada, para diferentes períodos de retorno, se generó una tormenta de diseño que se aplica como patrón de distribución a cada uno de los espesores de lluvia diaria utilizada en la modelización. El distribuidor característico de la lámina de lluvia diaria corresponde a la curva IDF con un período de retorno de 2 años, detallada en forma acumulada a través del siguiente gráfico:

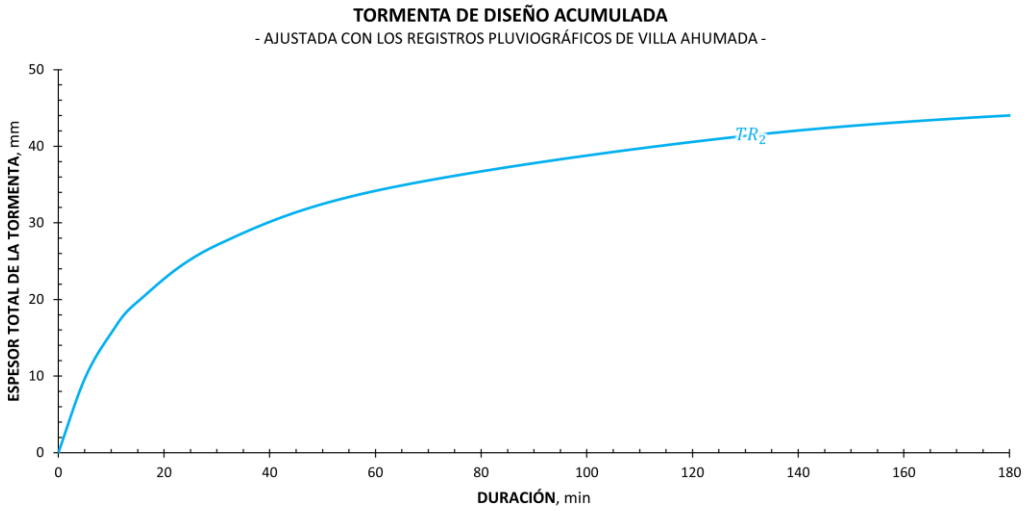


Gráfico 25. Tormenta de diseño para un período de retorno de 2 años.

6.9.4 Estimación de la evapotranspiración

Uno de los primeros desafíos al realizar una modelización hidrológica es el establecimiento de variables que pueden conceptualizarse como parte de una estimación, donde es necesario el definir componentes de entrada y salida, tal como lo detalla el método SMA en apartados anteriores.

[44] Fue posible trasladar los registros pluviales diarios desde el 1 de octubre de 1987 hasta el 18 de mayo de 2025, para un total de 38 años hidrológicos completos.
Asimismo, se realizó una verificación de los acumulados anuales de precipitación con los estimados en el estudio titulado "Evaluación del recurso hídrico en su régimen natural", colaboración entre la Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente y la Universidad Nacional Autónoma de Honduras, en 2014.

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

En el caso del recurso hídrico, en términos muy generales, la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo forma el concepto de evapotranspiración, que representa la evaporación del agua y la transpiración del cultivo (FAO, 1990, pág. 3).

En 1948, *Howard Penman* combinó el balance energético con el método de la transferencia de masa y derivó una ecuación para calcular la evaporación de una superficie abierta de agua a partir de datos climáticos estándar de horas sol, temperatura, humedad atmosférica y velocidad de viento. Este método conocido como combinado fue desarrollado posteriormente por muchos investigadores y ampliado a las superficies cultivadas por medio de la introducción de factores de resistencia.

No obstante, fue hasta 1990 cuando la FAO organiza un panel de expertos, en colaboración con la Comisión Internacional para el Riego y Drenaje y con la Organización Meteorológica Mundial, con el fin de revisar las metodologías previamente propuestas por la FAO para el cálculo de los requerimientos de agua de los cultivos y para elaborar recomendaciones sobre la revisión y la actualización de procedimientos a este respecto (FAO, 1990, pág. 7).

El panel de expertos recomendó la adopción del método combinado de Penman-Monteith como nuevo método estandarizado para el cálculo de la evapotranspiración de referencia[45] y aconsejó sobre los procedimientos para el cálculo de los varios parámetros que la fórmula incluye.

La evapotranspiración de referencia ET_o provee un estándar de comparación mediante el cual se puede comparar la evapotranspiración en diversos períodos del año o en otras regiones y se puede relacionar la evapotranspiración de otros cultivos.

La ecuación utiliza datos climáticos de radiación solar, temperatura del aire, humedad y velocidad del viento. Para asegurar la precisión del cálculo, los datos climáticos deben ser medidos o ser convertidos a 2 m de altura, sobre una superficie extensa de pasto verde, cubriendo completamente el suelo y sin limitaciones de agua (FAO, 1990, pág. 25).

La FAO, para la aplicación de la ecuación de evapotranspiración de referencia, sugiere obtener datos de radiación, temperatura del aire, humedad atmosférica y velocidad del viento. Otras variables pueden ser obtenidas de tablas y valores aproximados según la latitud terrestre.

Por el contrario, en los casos en los que no se tiene disponibilidad de datos meteorológicos de radiación solar, humedad relativa o velocidad del viento, como una opción alternativa[46], la ET_o se puede estimar usando la propuesta desarrollada por Javier García Benavides y Javier

BORRADOR

[45] *La evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) representa la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, sin restricciones de humedad. El cultivo de referencia es un tipo hipotético de pasto con características específicas, y no es recomendable el nombrar esta evapotranspiración como potencial, para evitar ambigüedades.*

[46] *La estimación de la ET_o, mediante las relaciones propuestas por Hargreaves, es considerada como válida, ante la ausencia de variables climáticas necesarias para realizar la estimación mediante la ecuación FAO Penman-Monteith* (FAO, 1990, pág. 64).

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

López Díaz, presentada en la VII Reunión Latinoamericana adaptada al trópico (15°N – 15°S), en 1970, detallada a través de la siguiente expresión:

$$ETP = 1.21x10^{7.45T/(234.7+T)}(1 - 0.01HR) + 0.21T - 2.30$$

, donde ETP Evapotranspiración potencial, $mm\ day^{-1}$
T Temperatura media diaria del aire a 2 m de altura, $Celsius$
HR Humedad relativa del aire a 2 m de altura, %

De esta forma, se realizó un ajuste de los valores de ET_o estimados con las variables climáticas de la Estación Climatológica Tegucigalpa, asociándolos con los acumulados anuales de las isolíneas de evapotranspiración disponibles en el *Sistema Nacional de Información Territorial* (SINIT[47]).

En atención al tamaño de la subcuenca bajo estudio, la modelización hidrológica mediante el SMA se realizó para lapsos de tiempo de 10 minutos, intentando representar las intensidades en la evolución de las tormentas diarias de forma que no afectara sensiblemente la representación de los hidrogramas detallados a nivel horario, comprendiendo un período de modelización desde el 1 de octubre de 1987 hasta el 18 de marzo de 2025, para un total de 38 años de generación de caudales.

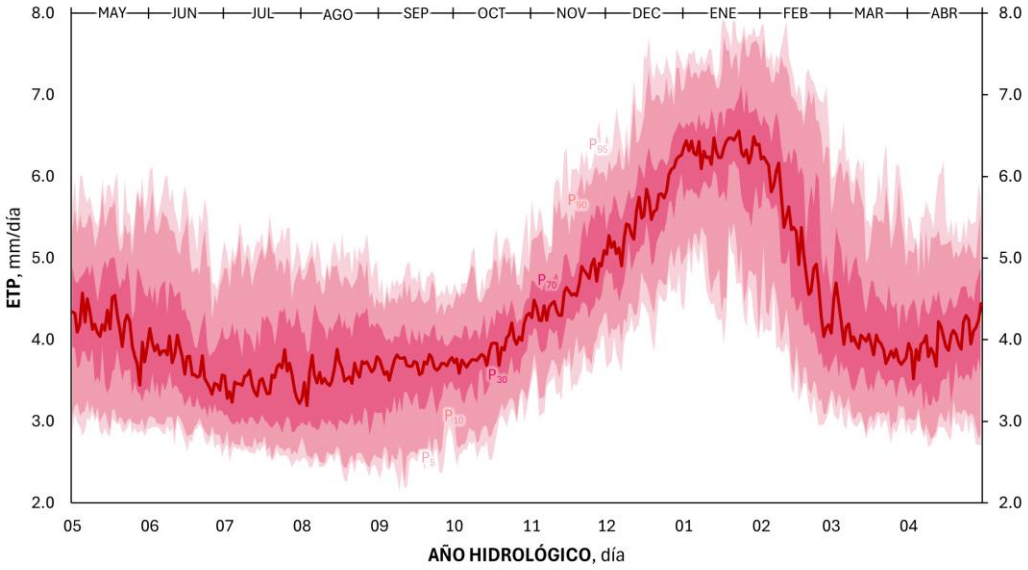


Gráfico 26. Percentiles diarios de la ETP mediante el método de García B. – López D. para un año hidrológico característico en la Estación Hidrometeorológica La Escuela.

Una inspección al gráfico anterior nos permite identificar el período comprendido entre diciembre a febrero como los meses con más evapotranspiración, esto se debe a la disponibilidad de humedad en el ambiente, donde justo después de finalizar el período

[47] *El geoportal del SINIT es el siguiente: http://www.sinit.hn/*

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

lluvioso, la humedad de la cuenca se encuentra en sus valores más altos del año, y esto se refleja a través de la humedad relativa registrada.

6.9.5 Resumen de los caudales medios diarios sintéticos

La conceptualización del modelo de balance hídrico mediante el procedimiento SMA en HEC-HMS, se detalla a través de la siguiente ilustración:

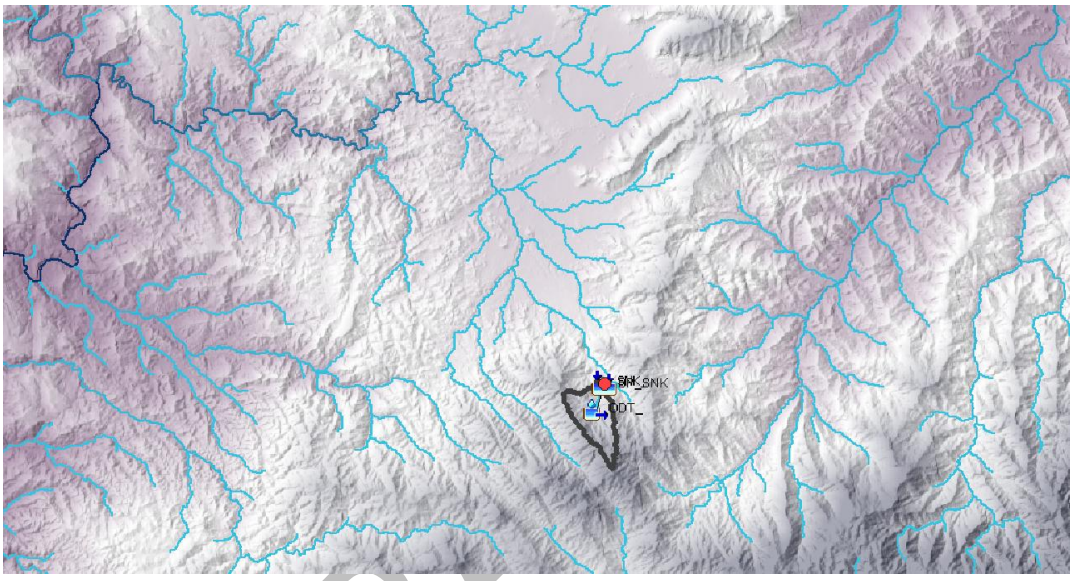


Ilustración 24. Captura de pantalla del modelo hidrológico conceptual SMA en HEC-HMS.

Los caudales medios diarios como resultado de la simulación del balance de humedad en la microcuenca de La Quebrada se detallan mediante la siguiente ilustración, captura directa del modelo HEC-HMS:

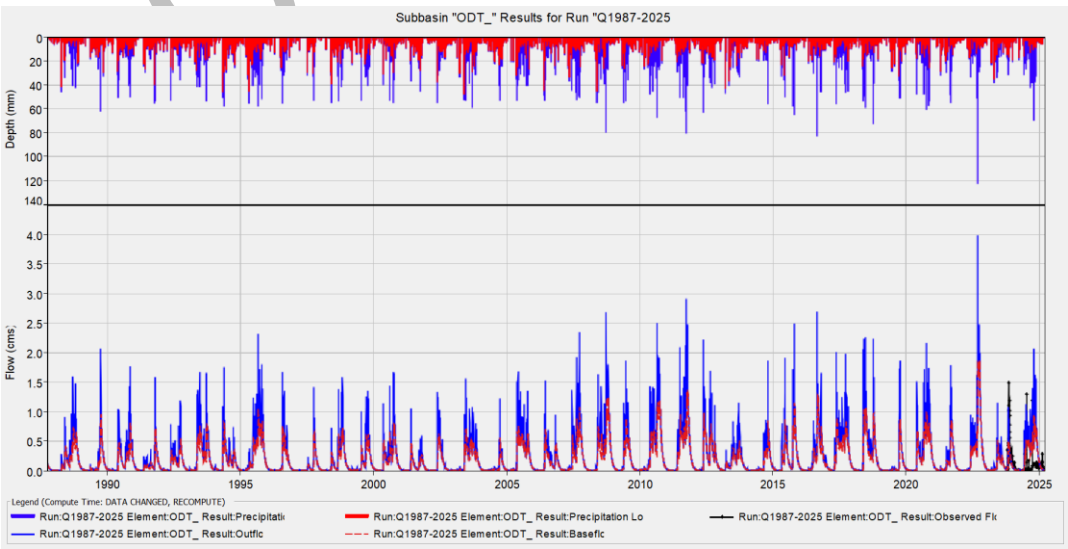


Ilustración 25. Simulación de la precipitación horaria en la subcuenca y su respuesta en forma de escurrimiento.

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

6.9.6 Análisis estadístico del escurrimiento sintético anual

Realizando un análisis estadístico de los percentiles, de los caudales medios diarios sintéticos, se ha construido el siguiente gráfico de los hidrogramas a nivel diario para un año hidrológico característico:

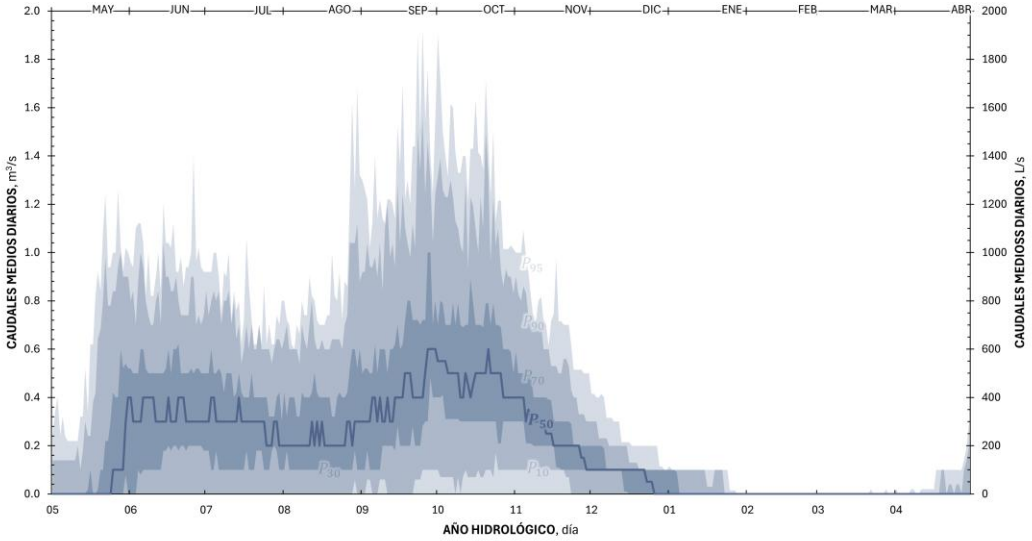


Gráfico 27. Caudales medios diarios sintéticos a lo largo de un año hidrológico característico.

Las mediciones de la corriente, en conjunto con las experiencias del personal a cargo del manejo y operación de la obra de toma, nos confirman que existen al menos dos meses críticos durante el estiaje: febrero a marzo. Ya a mediados de abril, con las primeras lluvias que dan por iniciada la temporada lluviosa, el flujo base de la corriente empieza a mostrar un progresiva recuperación.

Por otro lado, puede apreciarse que la simulación hidrológica de las condiciones de humedad de la cuenca ha podido representar satisfactoriamente el comportamiento bimodal de los aportes fluviales, asociados a la variación de las lluvias durante el período lluvioso.

6.9.7 La Curva de Duración característica

La curva de duración[48], también conocida como *curva de caudales clasificados*, es el arreglo de los caudales medios diarios asociados a una probabilidad empírica de excedencia, en este caso, se ha recurrido a la probabilidad de Hazen. Esta curva representa la probabilidad de que encontremos un caudal determinado un día cualquiera del ciclo hidrológico.

Para ello, los aportes fluviales estimados a nivel diario han sido ordenados en un arreglo probabilístico de su porcentaje del tiempo excedido, valores que se detallan a continuación:

[48] *La curva de duración representa el porcentaje del tiempo para el cual un caudal puede ser igualado o excedido.*

BORRAR

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

Tabla 17. Valores de la curva de duración característica para el período 1987-2025.

Período 1987-2025			
Porcentaje, %	Q, m^3/s	Porcentaje, %	Q, m^3/s
0.1	2.240	50	0.090
1	1.470	60	0.060
2	1.260	70	0.036
5	0.950	80	0.023
10	0.680	90	0.014
15	0.510	95	0.011
20	0.390	96	0.011
30	0.240	98	0.010
40	0.150	99.9	0.009

La revisión de los valores de esta curva de duración ha permitido cuantificar la disponibilidad del recurso en forma de aportes fluviales de la corriente que, de forma práctica se le denomina *oferta hídrica*. Las categorías siguientes responden a la valoración de las necesidades de regulación a través de un reservorio, estimando que el recurso disponible se encuentra de un 3% a un 15% en etapa crítica, mientras que los recursos aprovechables deberían estar disponibles en un 80% del tiempo, aproximadamente.

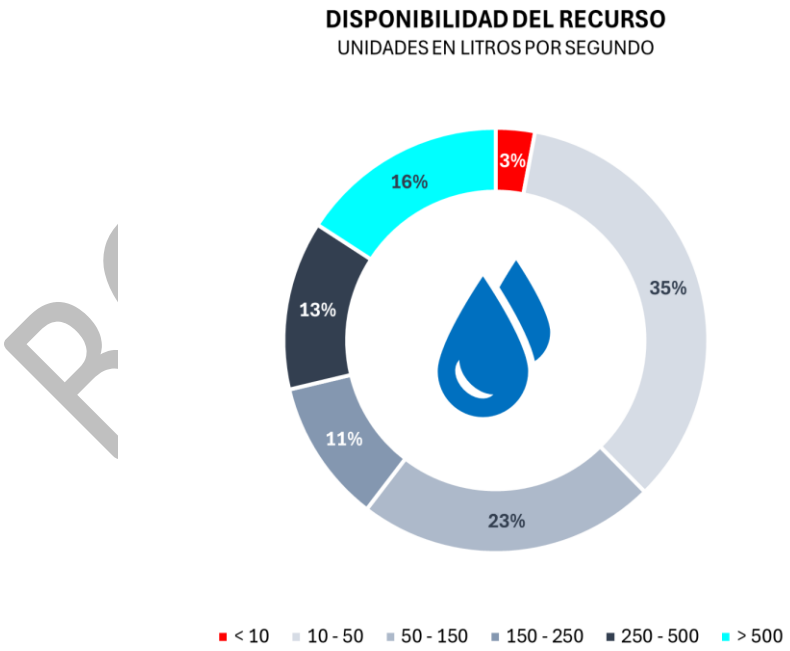


Gráfico 28. Disponibilidad del recurso hídrico según la oferta simulada de La Quebrada.

El gráfico de la curva de caudales clasificados, ajustados a los resultados de la simulación hidrológica mediante SMA, se detalla a través del siguiente gráfico:

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

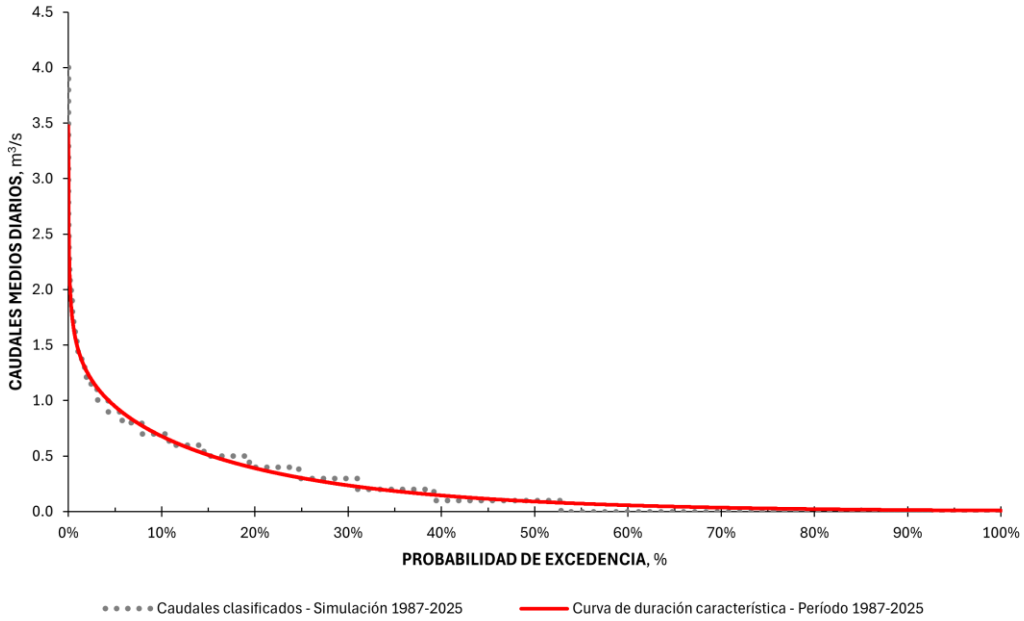


Gráfico 29. Curva de duración para el período de simulación hidrológica 1987-2025.

6.10 Determinación de caudales de diseño

Tal como se detalló previamente, los hidrogramas de avenida representan la huella dactilar de la cuenca como respuesta de ésta a un evento pluvial con capacidad de generar escorrentía directa, que eventualmente contribuye a definir la magnitud del máximo de la avenida.

Para representar estos eventos, se recurre a modelos computacionales que simplifican la labor de estimación de las unidades de respuesta hidrológica, así como la conceptualización de los tramos de tránsito de la avenida, considerando la correspondiente atenuación de las ordenadas del hidrograma en respuesta a las perdidas energéticas, y el almacenamiento temporal propio de las avenidas en las vegas de la corriente.

La estimación del tiempo de concentración de las aguas, detallada anteriormente, sirvió de base para definir la duración de las tormentas de diseño, y asociarlas a diversas probabilidades de ocurrencia, apoyada en los registros pluviales de corta duración disponibles en la estación localizada en el Aeropuerto Internacional de Villa Ahumada.

6.10.1 Simulación hidrológica de eventos en HEC-HMS

En términos generales, la simulación hidrológica de eventos se apoya en los registros pluviales de corta duración, mediante la estimación de las tormentas asociadas a diferentes probabilidades de ocurrencia, con una duración mínima equivalente al tiempo de concentración de la unidad de respuesta hidrológica, tal como lo sugiere el otrora *Soil Conservation Service* en el *National Engineering Handbook* (Conservation Service, 1997, págs.

BORRADOR

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

11-15), y posteriormente derivar un hidrograma sintético apoyado en la teoría de Víctor Mockus[49].

En las siguientes secciones se detallará el proceso de obtención de los caudales de avenida de interés.

6.10.2 Registros pluviales de corta duración

Si bien el conocimiento de la lámina de lluvia diaria resulta un invaluable recurso, es necesario definir un distribuidor que permita relacionar las intensidades con las duraciones de las tormentas y asociarlas a diferentes probabilidades de ocurrencia, en especial, cuando los tiempos de concentración de las aguas son relativamente cortos.

Ante esta necesidad, se consideró oportuno el recurrir a las Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) de la Estación Climatológica de Villa Ahumada, y con ellas derivar la evolución de los espesores de precipitación de interés. Estas relaciones se detallan a través del siguiente gráfico:

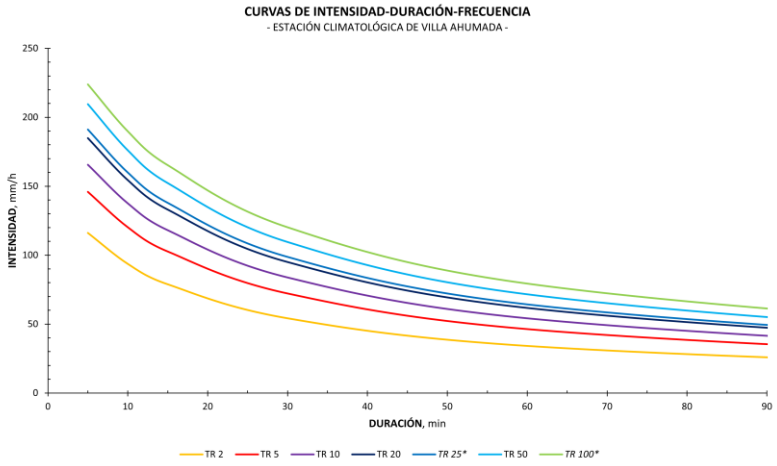


Gráfico 30. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia de la Estación Climatológica de Villa Ahumada.

6.10.3 La tormenta de diseño

La estimación de una tormenta sintética que acumule la lámina de lluvia, asociada a un determinado evento de interés, constituye la base de un modelo lluvia-escorrentía. El procedimiento de los bloques alternos propuestos por Chow (Chow, Applied Hydrology, 1988) se considera apropiado para representar la evolución temporal del aguacero, considerando la extensión de las superficies de aportación.

[49] *Victor Mockus fue el desarrollador de la teoría del hidrograma unitario sintético propuesta por el Soil Conservation Service en 1969.*

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

Un espesor de lámina de lluvia total que iguale, o exceda ligeramente los tiempos de concentración de la unidad hidrológica, para diversas probabilidades de ocurrencia, ha sido adoptado como evento pluvial de interés. Las probabilidades de ocurrencia de mayor interés corresponden a los períodos de retorno de 25, 50 ,100, 200, 500 y 1000 años.

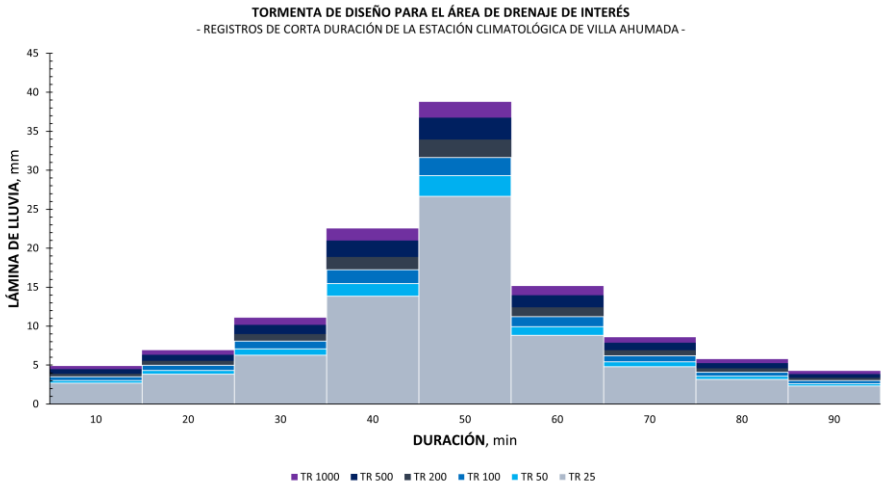


Gráfico 31. Tormenta de Diseño para el área de drenaje de La Quebrada, sobre la cota 925 m s.n.m.

De igual forma, el acumulado total de los eventos asociados a los períodos de retorno se muestra a través del gráfico siguiente:

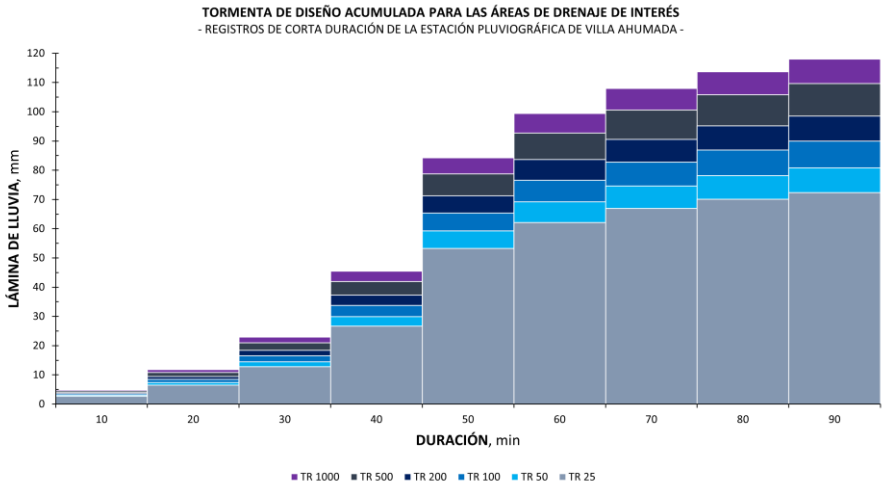


Gráfico 32. Tormenta de Diseño para el área de drenaje de La Quebrada, sobre la cota 925 m s.n.m.

6.10.4 Resumen de los caudales de avenida para diversos períodos de retorno

Los hidrogramas de avenida que representan la respuesta de la unidad hidrológica de La Quebrada, para diversos períodos de retorno, se resumen a continuación a través de la siguiente tabla:

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

Tabla 18. Resumen de los caudales de avenida en la Subcuenca de La Quebrada.

Código	Corriente	Área, km^2	Q_{25}	Q_{50}	Q_{100}	Q_{200}	Q_{500}	Q_{1000}
UH00	La Quebrada	3.2	15.2	20.7	26.8	33.1	41.8	48.5

Caudales estimados ante una condición antecedente de escurrimiento tipo II. Unidades de m^3/s.

Los períodos de retorno correspondientes a 50 y 100 años son de particular interés en vista que una estructura de tipo embalse debe ser capaz de resistir el impacto de avenidas atípicas en extremo, siendo la estimación de la *Crecida Máxima Probable* (CMP), la avenida de diseño por excelencia para este tipo de obras civiles; no obstante, al momento de desarrollar este estudio, no fue necesario definir una CMP, asociada a la *Precipitación Máxima Probable* (PMP), encontrándose la crecida milenaria[50] como una solución aceptada según la literatura, reemplazando la necesidad de estimar una CMP.

Finalmente, un resumen de la representación gráfica de los hidrogramas de avenida, mediante modelización hidrológica de la tormenta de diseño, se detalla a través del siguiente gráfico:

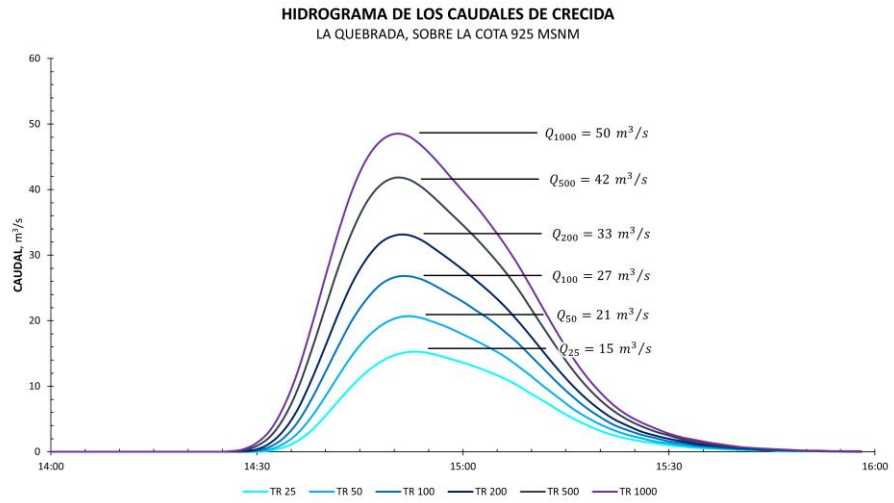


Tabla 19. Hidrograma de los caudales de avenida para los períodos de retorno de 50, 100, 200, 500 y 1000 años

[50] *Los ingenieros hidráulicos japoneses a menudo recurren a la crecida diez milenaria como evento para someter a prueba una obra civil de tipo embalse, no obstante, por la magnitud de la obra, se ha considerado que la crecida milenaria sería suficiente.*

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

7. EL RESERVORIO

Concluida la etapa de la valoración de los aportes fluviales de La Quebrada, hasta el potencial sitio de presa, resulta natural el analizar si existe capacidad suficiente para almacenar los volúmenes que brindan los escurrimientos ofrecidos por la microcuenca.

Para ello, el detallado levantamiento topográfico[51] mediante LiDAR ha permitido representar la morfometría del potencial reservorio, sirviendo de insumo para obtener las relaciones entre la altura del embalse, su volumen de almacenamiento y superficie del espejo de agua.

7.1 Características del reservorio

Inicialmente, para poder conceptualizar el potencial reservorio, fue necesario definir el eje de este. La ilustración que detalla la ubicación del reservorio se detalla a continuación:

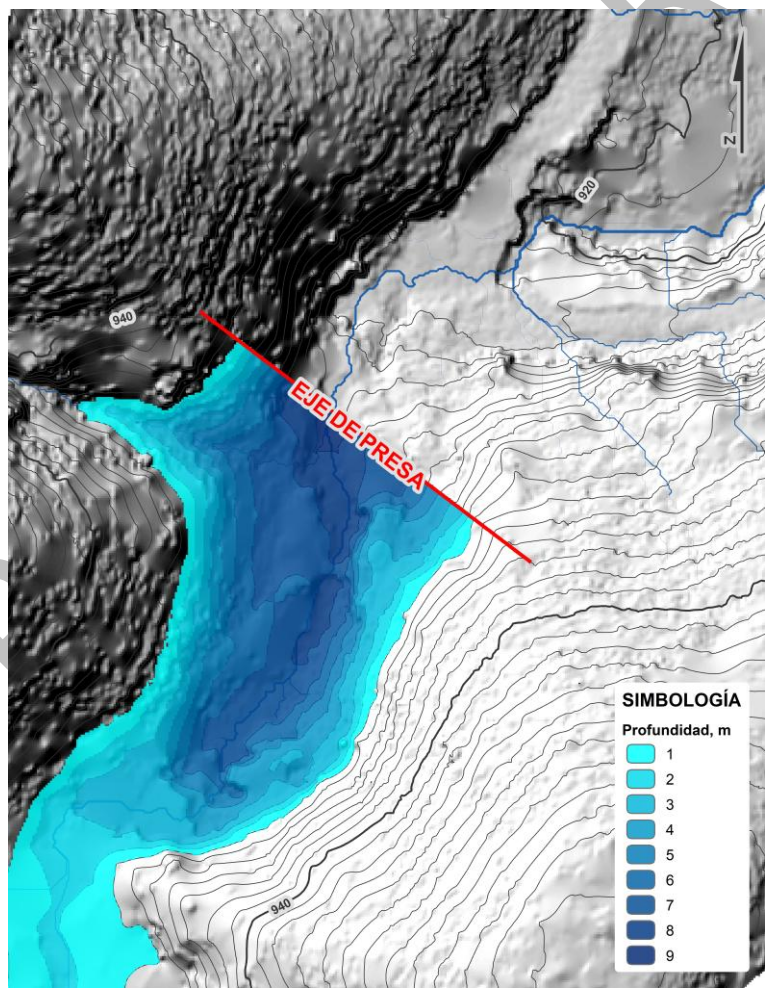


Ilustración 26. Ubicación del eje de presa propuesto para La Quebrada.

[51] *El levantamiento topográfico contempló representar la orografía del reservorio de forma que la densa vegetación no obstaculizara la determinación del modelo digital de terreno con una resolución espacial de 0.5 m por píxel.*

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

Las coordenadas que del eje de presa se detallan a continuación:

Tabla 20. Coordenadas de eje de presa en UTM WGS84 16P.

Concepto	Inicio del eje		Final del eje	
	Este, m	Norte, m	Este, m	Norte, m
Eje de presa	549689	1529517	549727	1529488

Recurriendo a herramientas de GIS fue posible estimar las relaciones de elevación-área-capacidad del reservorio. Este proceso de realizó mediante operaciones entre ráster y utilizando un espesor entre capas de análisis de 1 metro. La representación matemática de estas relaciones fue posible gracias a una función de ajuste por regresión, donde las expresiones que mejores resultados obtuvieron las siguientes:

$$A = a \cdot H \cdot (b + H)^{-1}$$

$$V = a \cdot (Z - b)^{c}$$

Las constantes a, b y c, son coeficientes de ajuste, mientras que la variable independiente es la altura H y la elevación Z. El área está representada por A, mientras que el volumen o capacidad del reservorio por V.

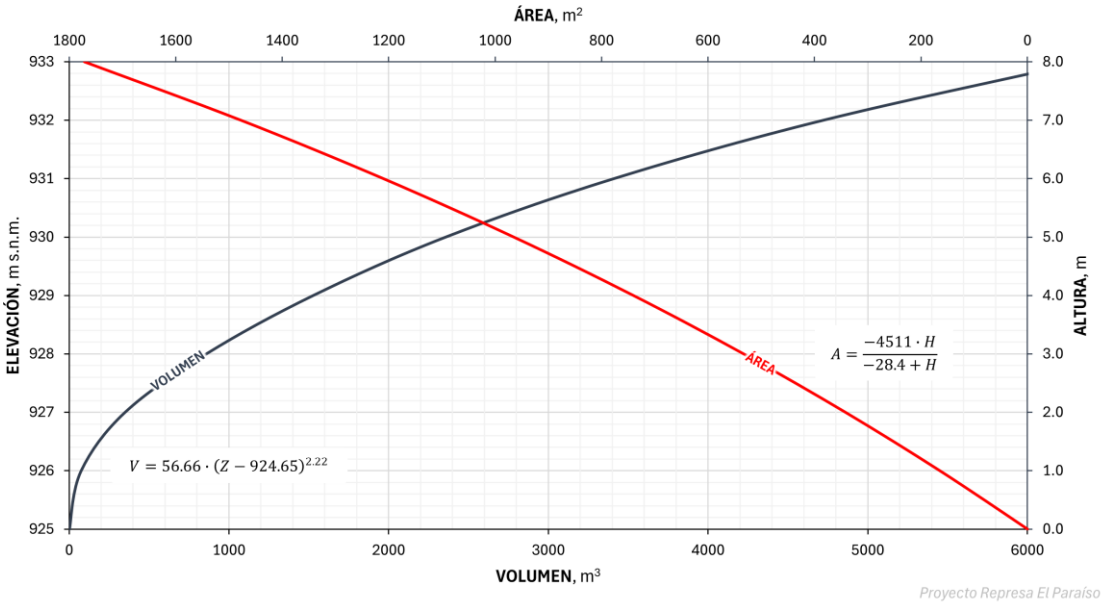


Gráfico 33. Curvas de elevación-área-capacidad del potencial embalse en La Quebrada.

El anterior gráfico facilita la comprensión de la evolución de la capacidad y área del espejo de agua en la medida que este incrementa el nivel de la superficie del agua. El eje vertical derecho muestra la elevación de la cortina del reservorio, partiendo de una cota de 925 m s.n.m. Por su parte, el eje vertical izquierdo define las elevaciones correspondientes para la altura de la cortina del potencial reservorio. Tanto la capacidad como el área del espejo de agua se pueden revisar, ya sea por la altura de la cortina, como por su elevación en metros sobre el nivel del mar.

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

Finalmente, el perfil longitudinal del eje del reservorio, con la potencial laminación del nivel de la superficie del agua, se detalla a través del siguiente gráfico:

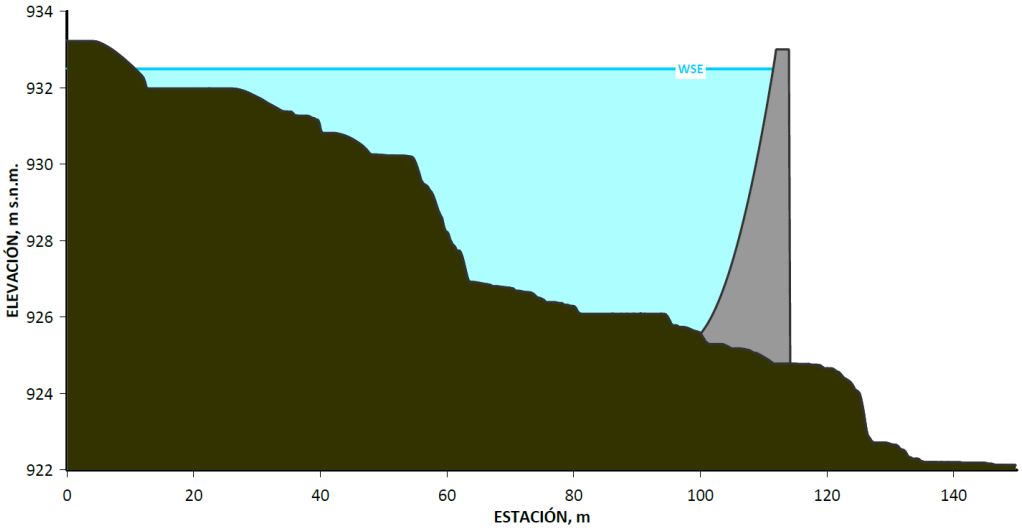


Gráfico 34. Perfil longitudinal del eje de presa con su correspondiente espejo de agua para una cota de 932.5 m s.n.m.

7.2 Operación del reservorio

Conocer los componentes que representan entradas y salidas en el reservorio constituye el desafío por atender, si deseamos simular el comportamiento del embalse. En esta ocasión, no se han considerado las pérdidas del sistema por infiltración ni por caudal ecológico, por lo que se contempla que los aportes fluviales de la corriente en estiaje, no considerados en estos cálculos, serán cedidos nuevamente a la corriente.

En general, podemos definir como datos de entrada a los caudales medios diarios, mientras que las salidas del sistema se encuentran constituidas por la evaporación del embalse y la dotación segura[52] por definir.

Si realizamos un breve análisis para identificar el volumen necesario de represamiento según la curva de caudales clasificados; todo lo que la curva de caudales clasificados no puede atender mediante la demanda o dotación establecida, representa la necesidad de represar. Por otro lado, esa necesidad de represar debe estar respaldada por los volúmenes por sobre la dotación, posicionados desde el inicio de esta, con las probabilidades de excedencia más bajos.

BORRADO

[52] *La dotación contempla la extracción que se realiza al reservorio para atender la demanda del recurso hídrico por parte de los pobladores de la ciudad de El Paraíso, de forma que se maximice la frecuencia de disponibilidad de agua para su aprovechamiento en un 95% del tiempo, reduciendo los períodos donde no es posible satisfacer la demanda con una tolerancia de 5% del tiempo.*

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

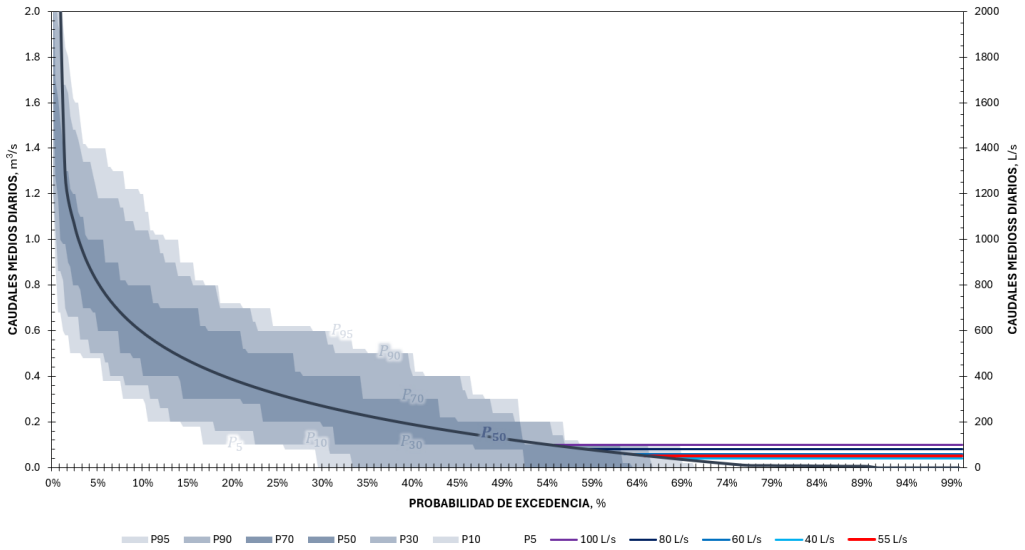


Gráfico 35. Curva de duración característica

La anterior representación gráfica de la variación de los aportes fluviales de La Quebrada, ordenados por su probabilidad de excedencia, facilitan la identificación de los volúmenes de aprovechamiento, con especial atención a la etapa en la que la corriente se deprime durante el estiaje, donde un aproximado de dos meses y medio La Quebrada manifiesta contribuciones ya comprometidas.

Tomando de referencia diferentes dotaciones por analizar, se proporciona el siguiente gráfico que detalla la operación del embalse para una dotación durante un período de 38 años, simulados mediante modelización hidráulica, considerando las pérdidas por evaporación.

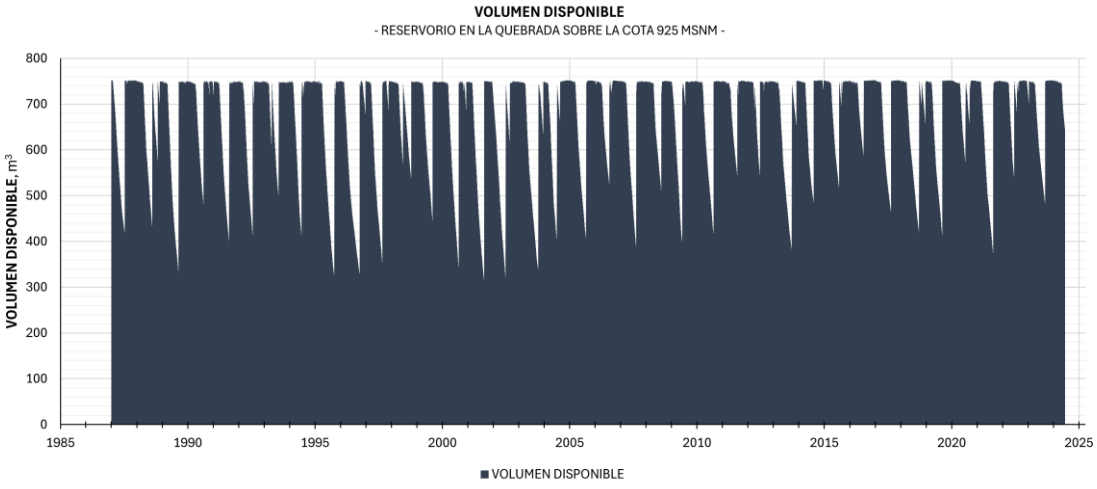


Gráfico 36. Simulación del comportamiento del embalse en La Quebrada, sobre la cota 925 msnm, con una dotación estimada en $\mathbf{55}\ \boldsymbol{l/s}$, equivalente a una extracción sostenida de 15.8 MMC anuales.

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

El gráfico anterior permite identificar claramente que, para un reservorio de aproximadamente 5x10^3 m^3, una dotación de $55\ l/s$ permite aún aprovechar una importante cantidad del volumen embalsado, con una garantía de 80% del tiempo de obtener esa dotación. El propósito es poder disponer de un margen de operación en la época más compleja, durante el estiaje, que depende de las condiciones de humedad brindadas por cada año hidrológico.

7.3 Estimación de la población objetivo

El Instituto Nacional de Estadística (INE), en su página oficial[53], se proporciona el acceso a los datos del XVII Censo Nacional de Estadística, pudiendo estos descargarse de forma tabulada para su análisis. Estos pueden filtrarse por edades, sexo, año, área geográfica y sus subsecuentes unidades administrativas.

En el caso de El Paraíso, se proporcionan los siguientes detalles de la población para cada municipio dentro del departamento, a través de la siguiente tabla:

Tabla 21. Población por municipio en el Departamento de El Paraíso.

Municipio	Código	Población 2025			
		Hombres	Mujeres	Totales	%
Yuscarán	0701	8812	8946	17758	3.3
Alauca	0702	4938	5043	9981	1.9
Danlí	0703	118460	123146	241606	45.3
El Paraíso	*0704*	*21929*	*26137*	*48066*	*9.0*
Güinope	0705	5172	5251	10423	2.0
Jacaleapa	0706	2144	2571	4714	0.9
Liure	0707	5702	5391	11093	2.1
Morocelí	0708	9913	10325	20239	3.8
Oropolí	0709	3338	2992	6330	1.2
Potrerillos	0710	2873	2712	5585	1.0
San Antonio de Flores	0711	3397	2765	6162	1.2
San Lucas	0712	**4587**	4295	8882	1.7
San Matías	0713	2985	2880	5864	1.1
Soledad	0714	5300	4072	9372	1.8
Teupasenti	0715	27946	25552	53497	10.0
Texiguat	0716	4910	4031	8941	1.7
Vado Ancho	0717	2355	1840	4195	0.8
Yauyupe	0718	819	704	1523	0.3
Trojes	0719	30514	28377	58891	11.0
TOTAL		**266093**	**267030**	**533123**	**100**

Puede apreciarse que el Municipio de El Paraíso posee aproximadamente el 9% de la población total del departamento, por lo que nada más resta el determinar la población estimada en su cabecera municipal, la Ciudad de El Paraíso. Para ello, se ha recurrido a la información disponible a través de

[53] http://181.115.7.199/binhnd/RpWebEngine.exe/Portal?BASE=PROYPOB&lang=ESP

BORRADOR

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

Global Population[54], procurando establecer la población en la ciudad a través de un comparación entre los valores estimados por el INE y los de GPOP.

La densidad poblacional, de acuerdo a GPOP para 2025, por hectárea de superficie, es proporcionada a través de la siguiente ilustración:

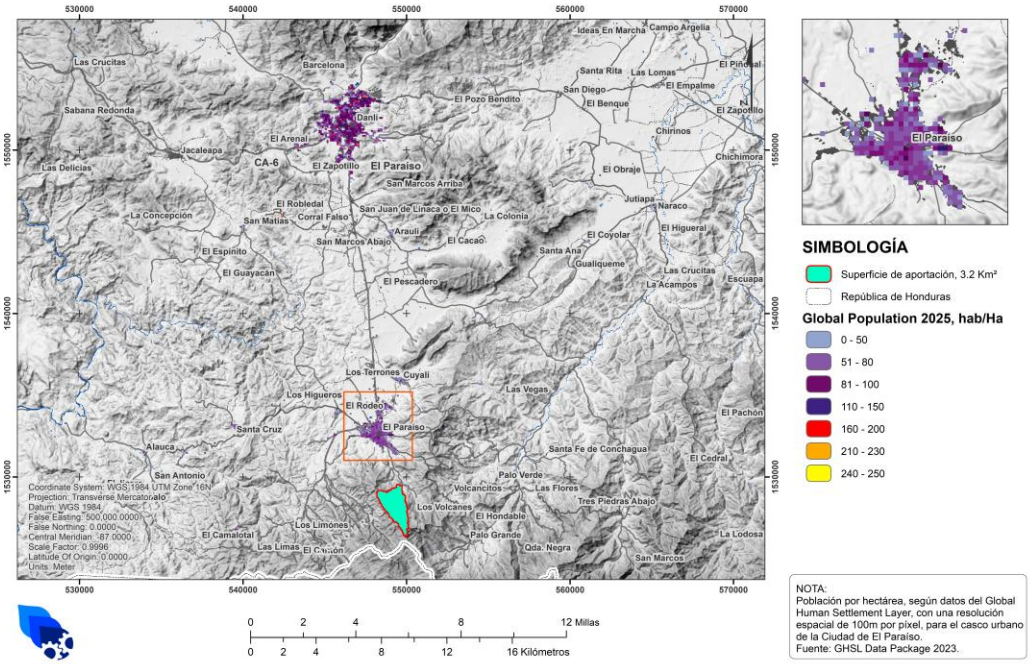


Ilustración 27. Distribución de la población

Adicional a estos registros, se procuró obtener las tasas de crecimiento poblacional[55] en el Municipio de El Paraíso para el período correspondiente de 2013 a 2030, según las proyecciones del INE. Las estimaciones de la tasa de crecimiento poblacional se encuentran muy por debajo de la fecundidad a nivel de reemplazo comúnmente referida a nivel mundial, catalogada en 2.1 hijos por mujer[56], según Naciones Unidas (División de Relaciones Externas del Fondo de Población de la Naciones Unidas, 2025, pág. 6).

El gráfico siguiente nos detalla la tendencia en declive de la tasa de crecimiento poblacional, ubicada en 1.42% para la proyección geométrica de la población para el año 2050. En esta ocasión, no se ha

BORR

[54] Global Population (GPOP) es un conjunto de datos espaciales georreferenciados en formato ráster que representan la distribución espacial de la población humana a nivel mundial, apoyados en censo nacionales, proyecciones y modelos de distribución espacial.

[55] Derivadas de las tasas de crecimiento poblacional para el departamento.

[56] La fecundidad a nivel de reemplazo es el parámetro de referencia que usan los demógrafos para representar el promedio de hijos que una mujer ha de tener para que el tamaño de la población se mantenga estable. Normalmente se sitúa en torno a los 2.1 hijos por mujer (Population Reference Bureau, 2025). El valor exacto de la tasa de fecundidad que serviría para garantizar el reemplazo de una generación cambia en función del país y también depende de otros factores tales como la tasa de mortalidad, la migración y la proporción entre los sexos de los recién nacidos, por mencionar algunos.

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

considerado la sugerencia de 3% de proyección en crecimiento poblacional, propuesta por el Servicio Autónomo Nacional de Acueductos y Alcantarillados (SANAA).

Gráfico 37. Tasa de crecimiento poblacional en el Municipio de El Paraíso en los últimos 12 años.

Con esta información, se ha construido la siguiente tabla que permite, a través de una simple relación lineal, establecer la población en la Ciudad de El Paraíso

Tabla 22. Estimación de la población en la Ciudad de El Paraíso y su proyección a 2050.

Origen	Departamento	Municipio	Ciudad
	El Paraíso	El Paraíso	El Paraíso
INE, 2025	533123	48066	*26587*[*]
INE, 2050	758434	68380	*37823*[*]
GPOP, 2025	535960	53198	26728
GPOP, 2050	762470	75681	38024

[*] *Estimación proyectada mediante la relación entre los datos del INE y GPOP.*

Adicional a ello, se ha tenido acceso al documento Honduras: Proyecciones de población por Departamento 2013-2030, donde también se detallan las tasas de crecimiento poblacional por año (Instituto Nacional de Estadística, 2023, págs. 255-279).

Con esta información, se ha elaborado la pirámide poblacional para la Ciudad de El Paraíso, detallada a través del siguiente gráfico:

BORRADOR

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Airbus Defense and Space GmbH. (2022). *Copernicus Digital Elevation Model Product Handbook.* Public.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements.* Utah: FAO Irrigation and drainage Paper 56.

American Association of State Highway and Transportation Officials. (2007). *Highway Drainage Guidelines.* Washington: FHWA.

American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. (2019). *LAS Specification Version 1.4-R15.* Bethesda, MD: ASPRS.

Asociación Esfera. (2018). *El Manual Esfera: Carta Humanitaria y normas mínimas para la respuesta humanitaria.* Ginebra, Suiza: Asociación Esfera.

Australia, E. (2010). *Appropiate Safety Criteria for People.* Sidney: Federal Government.

Beck, H. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., Lutsko, N. J., Dufour, A., . . . Miralles, D. G. (2023). High-resolution (1 km) Köppen-Geiger maps for 1901-2099 based on constrained CMIP6 projections. *Nature*, 16.

Benson, M. (1968). *Uniform Flood-Frequency Estimating Methods for Federal Agencies.* Washington: USGS.

Chow, V. T. (1964). *Handbook of Applied Hydrology.* New York: McGraw-Hill.

Chow, V. T. (1988). *Applied Hydrology.* Washington: McGraw-Hill.

Chow, V. T. (1994). *Open Channel Hydraulics.* Illinois: McGraw-Hill.

Conservation Service, N. R. (1997). *National Engineering Handbook, Part 630 Hydrology.* Washington: United States Department of Agriculture.

Departamento de Salud y Sanidad Forestal. (2017). *Informe del episodio de ataque del gorgojo descortezador del pino, Dendroctonus frontalis, en Honduras, 2014-2017.* Tegucigalpa: Instituto de Conservación Forestal.

División de Relaciones Externas del Fondo de Población de la Naciones Unidas. (2025). *La verdadera crisis de fecundidad.* Nueva York: UNFPA.

Emanuel, K. A. (1994). *Atmospheric convection.* New York: Oxford University Press.

FAO, F. (1990). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos.* United Nations.

Federal Emergency Management Agency. (2012). *Summary of Existing Guidelines for Hydrologic Safety of Dams.* Washington, D.C.: FEMA.

FEMA. (2018). *Guidance for Flood Risk Analysis and Mapping.*

BORRADOR

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

FHIS; INTEMA. (2002). *Manual de Referencias Hidrológicas.* Tegucigalpa.

García Benavides, J., & López Díaz, J. (1968). Clima Agrícola del cafeto (Coffea arabica) y zonas potenciales en los Andes de Venezuela. *Agronomía Tropical 18*, 57-85.

Gravelius, H. (1914). *Morphometry of Drainage Bassins.* Amsterdam.

Haan, C. (1977). *Statistical Methods in Hydrology.* Iowa: Iowa State.

Hawker, L., Uhe, P., Paulo, L., Sosa, J., Savage, J., Sampson, C., & Neal, J. (2022). A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. *Environmental Research Letters*, 2-10.

HEC. (2011). *HEC-HMS User's Manual.*

Hicks, D. M., & Mason, P. D. (1998). *Roughness Characteristics of New Zealand Rivers.* Christchurch, New Zealand: National Institute of Water and Atmospheric Research Ltd.

Hydrologic Engineer Center. (2011). *HEC-HMS Technical Reference Manual.* Washington: USACE.

INETER, & COSUDE. (2005). *Consideraciones técnicas para la elaboración de mapas de amenaza por inundación fluvial.* Managua, Nicaragua: INETER.

Instituto Nacional de Estadística. (2023). *Honduras: Proyecciones de población por Departamento. Tomo 10.* Tegucigalpa: INE.

Johnstone, D., & Cross, W. (1949). *Elements of applied hydrology.* New York: New York: Ronald Press.

JRC Scientific Information Systems and Database Report. (2023). *GHSL Data Package 2023.* European Union: European Commission.

Kirpich, Z. P. (1940). *Time of concentration for small agricultural watersheds.* Civil Engineering Editorial.

Kite, G. (1974). *Flood Frequency and Risk.* Ottawa: Inland Waters Directorate.

Landsea, C. W. (1992). A Climatology of Intense (or Major) Atlantic Hurricanes. *Colorados State University - Department of Atmospheric Science*, 11.

López Díaz, J. (1968). Resultados comparativos de mediciones y cómputos de evaporación y uso consuntivo. *Jornadas Venezolanas de Riego, 3as*.

M., G. (1934). Previsione delle piene e delle magre dei corsi d'acqua. *Istituto Poligrafico dello Stato*, 107-117.

Miller, V. (1953). *A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee.* Columbia University: Office of Naval Research.

National Resources Conservation Service. (2007). *Stream Hydrology.* Washington: National Engineering Handbook.

BORRADOR

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614

Natural Resources Conservation Service. (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds.* Washington: United States Department of Agriculture.

NRCS. (1999). *Urban Hydrology for Small Watersheds.* Washington: U.S. Department of Agriculture.

PNUD, & Cooperación Suiza en América Central. (2008). *Recomendaciones técnicas para la elaboración de Mapas de Amenazas por Inundaciones Fluviales.* PNUD.

Sala, M., & Gay, R. (1981). *Algunos datos morfométricos de la cuenca del Isábena.*

Salinas Núñez, A., Sánchez, M., Zúniga Andrade, E., & Funez, J. (2002). *Manual de Referencias Hidrológicas.* Tegucigalpa: Fondo Hondureño de Inversion Social.

Schumm, S. (1956). *The evolution of drainage systems and slopes in badlands at Pearth Amboy, New Jersey.* Bulletin of the Geological Society of America.

Snyder, F. F. (1964). *Hydrology of Spillway Design.* American Society of Civil Engineers.

SOPTRAVI. (1996). *Manual de Carreteras de Honduras: Tomo VI: Drenaje.* Tegucigalpa.

Témez, J. (2003). *Facetas del cálculo hidrometeorológico y estadístico de máximos caudales.* 47-51.

UNAH; SERNA. (2014). *Evaluación de los Recursos Hídricos en su régimen natural en Honduras.* Tegucigalpa: SERNA-UNAH.

United States Geological Survey. (1989). *Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains.* U.S. Department of Transportation.

Vásquez, J. D. (2024). *Historia del municipio de Copán Ruinas: un acercamiento a su historia ambiental 1578-2023.* Tegucigalpa.

BORRADOR

M.Sc. Carlos Ábrego Suárez / Hidrología superficial
abregosuarez@hotmail.com
CICH 6614